

Grado en Ingeniería Mecánica

Curso académico 2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Diseño y simulación de espumas a escala microscópica”

Francisco Javier de Diego Fernández

Tutor

Miguel Marco Esteban

Leganés, 18 de octubre de 2018

RESUMEN

En el presente informe se trata la modelización y posterior simulación por ordenador de espumas metálicas de poros abiertos y cerrados a nivel microscópico para obtener el módulo de Young y distribución de tensiones en función de la densidad relativa y del tipo de poro.

En primer lugar, se ha tenido en cuenta la influencia de las condiciones de contorno para que los resultados microscópicos sean macroscópicamente aceptables. A continuación, se ha estudiado la relación entre el tamaño de poro y el tamaño de espuma para que los resultados no dependan de ello y así evitar la fluctuación en los resultados. Por último, se han simulado tres espumas metálicas de diferentes materiales, tamaños y tipos de poros para validar el resultado.

Los resultados obtenidos del módulo de Young en función de la densidad relativa muestran una alta correlación con otros estudios experimentales, que pronostican que las espumas de poros cerrados muestran una mayor resistencia a la deformación que las de poros abiertos. En concreto, se ha obtenido que la relación entre la densidad relativa y el módulo de Young para espumas metálicas de poros abiertos es potencial con valor de 2 y que en el caso de poros cerrados es potencial con valor de 1.85.

Palabras clave: espuma metálica, módulo Young, poro, abierto, cerrado.

ABSTRACT

In the present paper, open and close porous metal foam are modeled and then computer simulated at a microscopic level to obtain Young's modulus and stress distribution as a function of relative density and the type of pore.

First of all, influence of boundary conditions has been taken into account so that microscopic results are macroscopically acceptable. Then, relationship between pore size and foam size has been studied to get consistent results which doesn't depend on these parameters, so to avoid fluctuation in the results. Finally, three metal foams with different materials, pore size and pore type has been simulated to validate the result.

Results obtained from Young's modulus as a function of relative density shows a high correlation with other experimental studies, which predict close porous metal foams to be more resistant to deformation than open porous metal foams. Specific, relationship between Young's modulus and relative density for open porous metal foams is a power law of 2 while for close pore metal foam is a power law of 1.85.

Palabras clave: metal foam, Young's modulus, pore, open, close.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a mis padres y abuelos, puesto que crearon las condiciones oportunas para que ya desde pequeño tuviera claro que iba a querer dedicarme a la ingeniería mecánica.

Agradecer también a mis compañeros de grupo, el camino ha sido duro pero ya estamos en el final después de mil y un baches que ya hasta recordamos con cariño.

Y por supuesto a todo el personal docente de la universidad por vuestra labor, especialmente a mi tutor Miguel Marco Esteban por darme la oportunidad de realizar este proyecto.

CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
2. Espumas metálicas	3
2.1 Introducción y definición	3
2.2 Caracterización	4
2.3 Fabricación.....	5
2.4 Aplicaciones.....	9
3. Modelización del problema.....	12
3.1 Generación y discretización del dominio.....	13
3.1.1 Distribución de poros en espumas metálicas de poros abiertos.....	16
3.1.2 Distribución de poros en espumas metálicas de poros cerrados.	17
3.2 Condiciones de contorno	18
3.3 Mallado	21
3.4 Programación del algoritmo.....	23
4. Problema a resolver.....	25
4.1 Módulo de Young	25
4.2 Tensión de Von Mises	27
4.3 Análisis de sensibilidad de la malla	27
4.4 Análisis del tamaño relativo entre espuma y diámetro de poro	29
4.5 Propiedades de los materiales a simular	31
5. Resultados	33
5.1 Módulo de Young	33
5.2 Distribución de tensiones en función del tipo de poro.....	39
5.3 Distribución de tensiones en función de la densidad relativa	42

6.	Conclusiones y trabajos futuros	43
6.1	Conclusiones	43
6.2	Trabajos futuros	44
7.	Planificación.....	45
8.	Presupuesto.....	48
9.	Referencias	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1. (a) Metal celular. (b) Espuma metálica. (c), (d) Esponjas metálicas. [3].....	3
Fig. 2.2. Comparativa entre espumas metálicas de poros cerrados (a) [4], abiertos (b) [3] y mixtas (c) [5].	5
Fig. 2.3. Esquema de espumado por inyección de gas en metal fundido [7].	6
Fig. 2.4. Esquema de espumado mediante agentes de soplado [7].....	6
Fig. 2.5. Esquema de espumado mediante refuerzo de hidrógeno [8].	7
Fig. 2.6. Esquema de deposición de metal en preformas poliméricas [8].	7
Fig. 2.7. Esquema de compactación de metal en polvo con agentes soplantes [9]	8
Fig. 2.8. Esquema de atrapamiento de gas durante la compactación de metal en polvo [8].	8
Fig. 2.9. Esquema de sinterización de esferas huecas [8].....	9
Fig. 2.10. Intercambiadores de calor de ERC materials & aerospace [14].....	10
Fig. 2.11. Cojinete hecho de espuma de aluminio [15].	10
Fig. 2.12. Absorbedor de impactos de (a) un Audi Q7 y (b) de un tren [10].	11
Fig. 2.13. Cafetería Baluarte, en Pamplona.	11
Fig. 3.1. Ejemplo de discretización de un sistema continuo mediante el método de elementos finitos. [16]	12
Fig. 3.2. Ejemplo de volumen elemental representativo de un conjunto [17].....	13
Fig. 3.3. Alzado de la probabilidad del centro geométrico de cada poro en comparación al cubo base.	15
Fig. 3.4. Detalle de separación de fragmentos en rojo del cuerpo principal para una porosidad del 90%.	16
Fig. 3.5. Mínima distancia entre poros para espumas metálicas de poros abiertos.	17
Fig. 3.6. Mínima distancia entre poros para espumas metálicas de poros cerrados.	17
Fig. 3.7. Comparativa de corte a un octavo entre generación de espuma de poro abierto (a) y otra de poro cerrado (b) para un 30% de porosidad.	18
Fig. 3.8. Ejemplo de condición de contorno periódica para una deformación (ϵ_{22}) en dirección negativa al eje X_2 [20].....	19
Fig. 3.9. (a) Representación del dominio de homogeneización para condición de contorno simétrica para un volumen cúbico. (b) Simplificación en planos de simetría del dominio de homogeneización.	19
Fig. 3.10. Esquema de las condiciones de contorno.	21

Fig. 3.11. Ejemplo de elementos de discretización en el método de elementos finitos [21].	22
Fig. 3.12. Diferencia entre el elemento C3D4 y el C3D10 [22]......	23
Fig. 3.13. Diagrama de flujo del código usado para la automatización del problema. ..	24
Fig. 4.1. Diagrama de fuerzas para el modelo simulado.	26
Fig. 4.2. Variación del módulo de Young adimensional y del tiempo de simulación para una espuma metálica con un 40% de porosidad en función tamaño de elemento adimensional.....	29
Fig. 4.3. Análisis del tamaño relativo entre el lado de la espuma metálica y el diámetro de poro.	30
Fig. 5.1. Comparativa de resultados de las simulaciones con expresiones validadas en otros estudios.	37
Fig. 5.2. Ilustración de partes separadas del cuerpo para una densidad relativa del 20%.	38
Fig. 5.3. Distribución de tensiones para espumas de aluminio con una densidad relativa del 70%.	39
Fig. 5.4. Distribución de tensiones para espumas de aluminio con una densidad relativa del 80%.	40
Fig. 5.5. Distribución de tensiones para espumas de aluminio con una densidad relativa del 90%.	40
Fig. 5.6. Distribución de tensiones para espumas de aluminio abiertas con densidades relativas de entre un 20% a un 90%.	42
Fig. 7.1. Diagrama de Gantt del proyecto	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Condiciones de contorno.	20
Tabla 4.1. Parámetros de las simulaciones a realizar.	32
Tabla 5.1. Resultados módulo de Young frente a densidad relativa de espuma de aluminio de poros abiertos.	34
Tabla 5.2. Resultados módulo de Young frente a densidad relativa de espuma de aluminio de poros cerrados.	35
Tabla 5.3. Resultados módulo de Young frente a densidad relativa de espuma de titanio de poros abiertos.	35
Tabla 5.4. Coeficientes de determinación para las simulaciones frente a expresiones experimentales.	37
Tabla 8.1. Presupuesto del proyecto	49

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Las espumas metálicas son metales con poros en su interior, lo cual reduce considerablemente su peso manteniendo propiedades del metal precursor, lo que las hace especialmente útiles para aplicaciones de estructuras ligeras. Además, también son buenas absorbiendo vibraciones y sonidos.

A pesar de que la fabricación de las espumas metálicas data de la década de 1940 y que entre los años comprendidos entre 1950 y 1970 se concedieron numerosas patentes, apenas hubo investigación de estos materiales más allá de las empresas que poseían dichas patentes. Durante esta época se intentaron introducir en industrias como la del automóvil, pero no tuvo buena aceptación, posiblemente porque la seguridad y el reciclado no era un problema por aquel entonces. No fue hasta 1980, coincidiendo con un aumento de las publicaciones científicas, cuando esta clase de materiales aumentó su interés en la industria, de forma que cada vez surgían más métodos de fabricación [1].

Son materiales, por tanto, con una antigüedad de en torno a 80 años, pero no fue hasta hace relativamente poco cuando se empezaron a investigar en profundidad, proceso que aún hoy en día sigue, lo que hace que sean materiales con gran proyección de futuro.

En la actualidad se siguen estudiando otras rutas de fabricación que permitan mayor sofisticación, por ejemplo, en el control del tamaño de poro, así como buscar cada vez estructuras más complejas. También se está tratando de caracterizar las propiedades de este tipo de materiales.

Industrias como la del automóvil, la náutica, la aeroespacial, la ferroviaria, la construcción civil o la biomédica muestran cada vez más interés en las espumas metálicas.

Conforme se mejoren los procesos de fabricación y se caractericen las propiedades se aumentarán las aplicaciones de este tipo de materiales.

1.2 Objetivos

Es de vital relevancia en un proyecto fijar los distintos objetivos que se pretenden alcanzar y la forma mediante la que se abordarán para su conquista.

El principal objetivo de este proyecto es diseñar y simular distintas espumas metálicas a escala microscópica, pero este objetivo principal se puede dividir en objetivos más específicos cuya consecución implica la culminación del principal.

El primer objetivo es diseñar geométricamente una espuma metálica en función de las propiedades geométricas principales de éstas para el mayor rango de porosidad posible. Para la consecución de este objetivo se ha creado un modelo en función del tamaño de la espuma y del diámetro, tipo y número de poros.

El segundo objetivo es el de diseñar la espuma a escala microscópica, es decir, la menor muestra posible de la espuma metálica cuyos resultados sean válidos. Para ello se ha estudiado el mínimo dominio de cálculo y la forma más apta de homogeneizar el material, para eliminar soluciones fluctuantes o incorrectas.

El tercer objetivo es el de obtener el módulo de Young relativo en función de la densidad relativa y del tipo de poro mediante modelos numéricos de elementos finitos. Se ha simulado un ensayo de compresión sobre diferentes espumas con diferentes densidades relativas para conseguirlo.

El cuarto objetivo es analizar las tensiones de las espumas metálicas en función de la densidad relativa y el tipo de poro.

El quinto objetivo es que este diseño y estos resultados sean aplicables a diferentes materiales. Para lograrlo se simularán espumas metálicas de aluminio y de titanio.

El sexto objetivo es la automatización del proceso. Se pretenden reducir los tiempos relacionados con el diseño y la simulación mediante el uso de un código de programación que de forma automática genere y simule la espuma metálica mediante elementos finitos.

El séptimo objetivo es comprobar que los resultados obtenidos son correctos. Para la validación de éstos se compararán los resultados con diferentes estudios experimentales y con datos de la literatura.

2. ESPUMAS METÁLICAS

2.1 Introducción y definición

Las espumas metálicas son metales con poros en su interior. Son un tipo de metal celular de baja densidad, pero buenas propiedades físicas, mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas.

No existe una diferencia clara entre las espumas metálicas y otros tipos de materiales porosos. Diversas publicaciones defienden que el término de espuma metálica solo ha de ser usado para materiales fabricados mediante la mezcla de metal fundido con gas, pues es el concepto de espumado lo que da el nombre al material. Según esta clasificación, es conveniente separar las espumas metálicas de otro tipo de metales con vacíos en su estructura [2]:

- Metales celulares: término general. El metal divide el espacio en celdas individuales separadas entre ellas.
- Metales porosos: tipo de metal celular de poros redondos y aislados entre ellos.
- Esponjas metálicas: tipo de metal celular con vacíos conectados entre ellos.
- Espumas metálicas: tipo de metal celular originado a partir de metal líquido. Sus celdas son cerradas, redondas o poliédricas y están separadas por paredes delgadas.

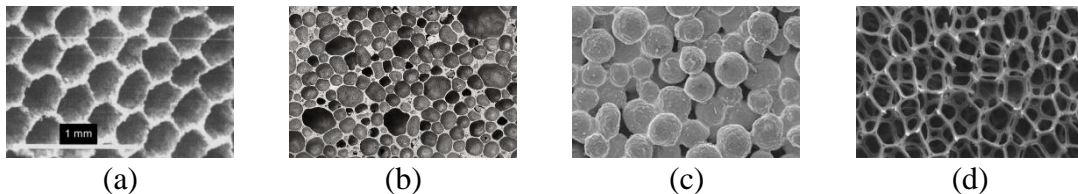


Fig.2.1. (a) Metal celular. (b) Espuma metálica. (c), (d) Esponjas metálicas. [3]

No obstante, en la práctica esta clasificación a menudo no se lleva a cabo y el término de espuma metálica se usa para otros materiales que no han sido espumados. Si bien es cierto que a menudo los materiales reales distan de ser perfectos, por lo que en ocasiones es realmente complicado clasificar un material poroso, pues puede compartir propiedades de otros materiales de la misma rama.

Pero más allá de que ciertos materiales sean difíciles de clasificar, lo cierto es que está relativamente aceptado nombrar a las esponjas metálicas como espumas metálicas de poros abiertos. Si se repasa la definición propuesta de espuma metálica se observa que, teóricamente, una espuma metálica ha de tener poros cerrados, pero esto no se está cumpliendo.

Las espumas metálicas son de diversos materiales, aunque las más extendidas son las de aluminio debido a su menor coste. También hay espumas de titanio o cobre, por ejemplo.

En cuanto a los poros contenidos en las espumas metálicas pueden ser de diversos tipos y tamaños. Pueden formarse aleatoriamente en cualquier punto del volumen o formar una red reticulada de alta precisión cuya forma puede ser irregular o pueden ser polígonos perfectos, según la fabricación. En cuanto a su tamaño, según el material o la forma de fabricación, oscila entre 100 μm y 25 mm de diámetro, aunque generalmente varía entre 0.5 mm y 5 mm para la mayoría de las aplicaciones. Los poros pueden superponerse o no, dependiendo del tipo de espuma.

2.2 Caracterización

Las propiedades de las espumas metálicas dependen de diversos parámetros que son convenientes explicar para poder entender el grueso del proyecto.

En primer lugar, el parámetro principal que define a una espuma metálica es la densidad relativa (ρ/ρ_0), que se define como la relación de la densidad de la espuma (ρ) y la densidad del metal precursor (ρ_0). Esta propiedad define la proporción de metal sólido existente en la espuma frente al volumen total, incluyendo los poros. Es la variable de la que dependen fundamentalmente las distintas propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de las espumas.

Alternativamente, se puede definir la porosidad (p) como forma de expresar la proporción del volumen de los poros existentes respecto del volumen total.

$$p = 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.1)$$

Esta propiedad es la que más influencia sobre las propiedades de la espuma tendrá, pero no es el único parámetro que afecta a las propiedades. El tipo de poro, así como su distribución, forma y tamaño, en menor proporción, pueden variar las propiedades.

Las espumas metálicas se pueden clasificar según sus poros sean cerrados, abiertos o mixtos. También se puede encontrar en la literatura el nombre de celda, como sinónimo de poro. Como su nombre indica, las espumas metálicas que contienen poros cerrados se caracterizan porque sus poros no están en contacto entre ellos, sino que se les separa una pared de material sólido. Por su parte, en las espumas metálicas de poros abiertos los

poros están conectados entre ellos. Se puede dar el caso de que haya especímenes con poros cerrados y abiertos, denominados mixtos.

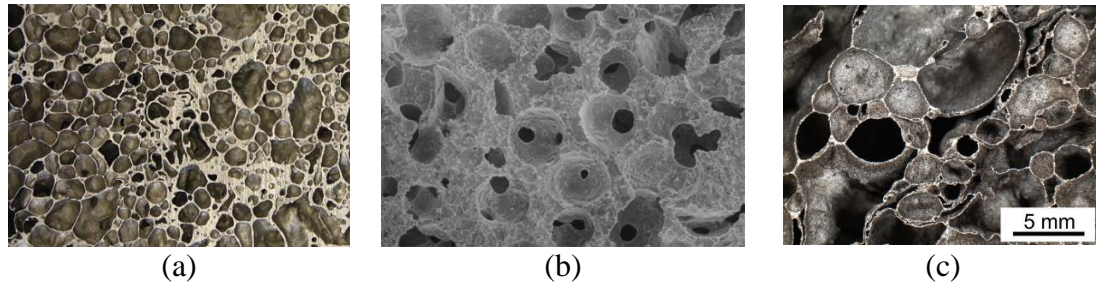


Fig. 2.2. Comparativa entre espumas metálicas de poros cerrados (a) [4], abiertos (b) [3] y mixtas (c) [5].

2.3 Fabricación

El nombre de espuma metálica proviene de las técnicas de fabricación empleadas para conseguir estos materiales, consistentes en el espumado del metal. Se explicarán siete procesos diferentes reportados en diferentes estudios [2, 6-8], que se pueden diferenciar en dos tipos principales de manufactura: mediante metal fundido o mediante metal en polvo. Normalmente las técnicas de fabricación de metal fundido dan lugar a espumas de poros cerrados mientras que con metal en polvo se suelen obtener poros abiertos.

El primer método es un proceso de espumado por inyección de gas sobre el metal fundido. Es usado generalmente para fabricar espumas de aluminio. Para ello, se ha de añadir previamente carburo de silicio, óxido de aluminio u óxido de magnesio al metal y mezclarlo, para que las partículas queden uniformemente distribuidas. Estos compuestos añadidos incrementan la viscosidad. Una vez mezclado se inyecta gas, típicamente aire, nitrógeno o argón, de tal forma que se generan burbujas de gas en la mezcla uniformemente repartidas. Esta mezcla espumosa flota hasta la superficie donde se solidifica (Fig. 2.3).

Es posible espumar metales sin aditivos mediante la inyección de gases a una temperatura próxima a la de fusión. No obstante, sería un proceso más inestable que con aditivos debido a que no permanecen en estado líquido demasiado tiempo.

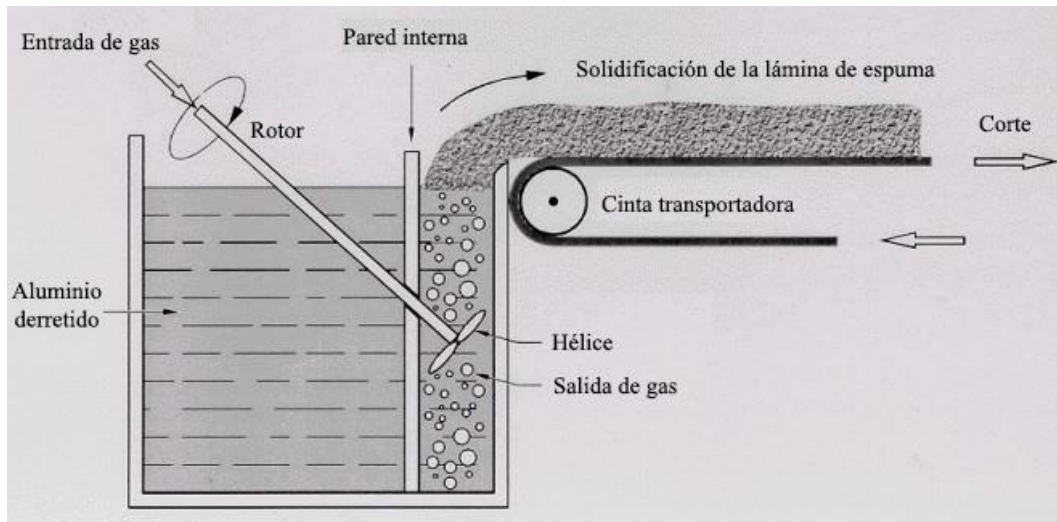


Fig. 2.3. Esquema de espumado por inyección de gas en metal fundido [7].

El segundo método es el proceso de espumado mediante agentes de soplado. Consiste en añadir agentes que se descomponen con las altas temperaturas y liberan gas sobre el metal fundido. Para aumentar la viscosidad se añade calcio al aluminio fundido. Una vez se obtiene la viscosidad deseada se inyecta el hidruro de titanio como agente soplante. El calor provoca que se libere el hidrógeno, produciendo el espumado (Fig. 2.4).

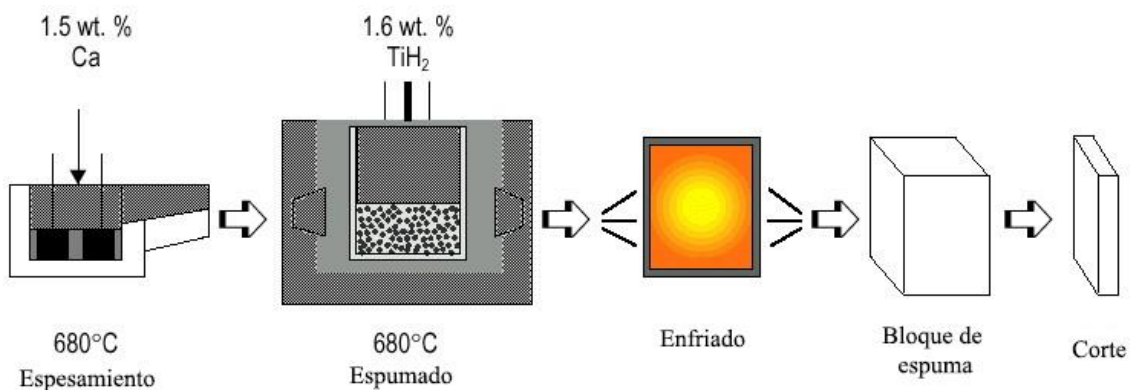


Fig. 2.4. Esquema de espumado mediante agentes de soplado [7].

El tercer método se basa en que en estado líquido algunos metales forman un sistema eutéctico con el gas hidrógeno. Si dicho metal se funde en una atmósfera de hidrógeno a alta presión se produce una mezcla homogénea entre el hidrógeno y el metal. Al enfriar la mezcla los poros quedan atrapados en el metal y se acaba formando la espuma metálica. Esta técnica se conoce generalmente como “GASAR” (Fig. 2.5).

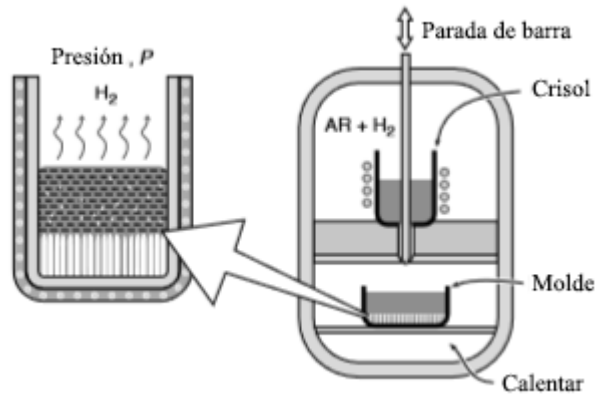


Fig. 2.5. Esquema de espumado mediante refuerzo de hidrógeno [8].

El cuarto método es usado para fabricar espumas metálicas reticuladas de poros abiertos. Consiste en la preparación de un molde de polímero al que se le llena de un material resistente a las altas temperaturas. Se elimina el polímero deritiéndolo y se rellena el hueco que dejó con metal fundido. Por último, se elimina el material del molde con agua a presión (Fig. 2.6).

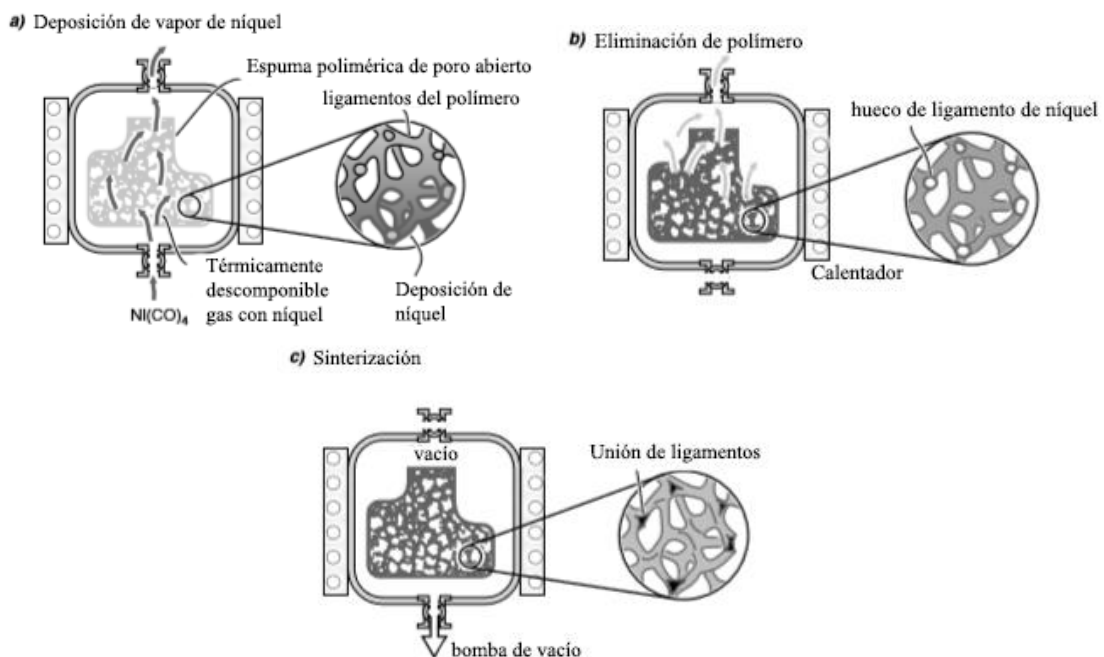


Fig. 2.6. Esquema de deposición de metal en preformas poliméricas [8].

El quinto método es el uso de metal en polvo mezclado con agentes soplantes. Una vez mezclado se compacta y se calienta hasta temperaturas cercanas a la de fusión para que el agente soplante se descomponga y libere el gas que produce el poro (Fig. 2.7).

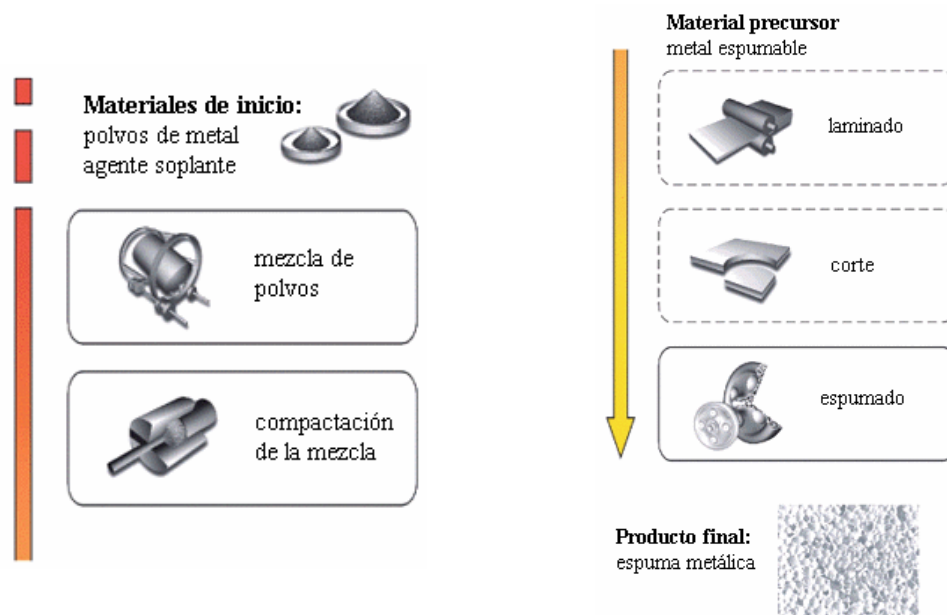


Fig. 2.7. Esquema de compactación de metal en polvo con agentes soplantes [9]

El sexto método consiste en atrapar el gas durante la compactación del metal en polvo, para ello se usa una lámina que actúa de envase alrededor de los polvos y el gas. Una vez compactado se aplica un tratamiento térmico. Al calentar el metal se expande debido a la presión del gas atrapado. Se suele usar para fabricar espumas de titanio (Fig. 2.8).

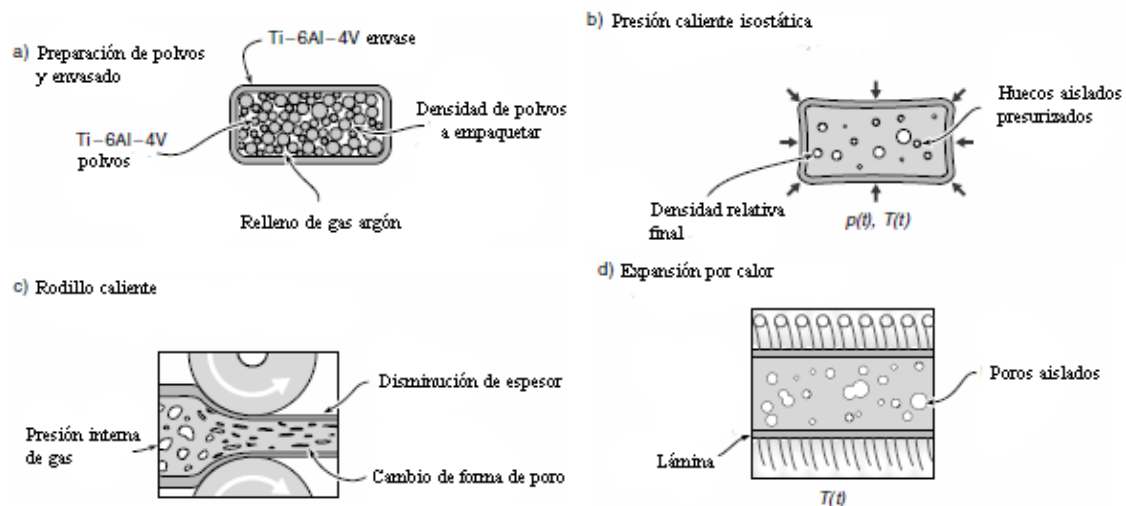


Fig. 2.8. Esquema de atrapamiento de gas durante la compactación de metal en polvo [8].

El séptimo método se basa en la sinterización de esferas huecas. Se obtienen mediante un precursor descomponible, aglutinantes y solventes. Se les aplica calor para eliminar el aglutinante y el solvente. Después se aplica un tratamiento que divide el metal del gas del precursor, dejando las esferas vacías. Se obtiene una espuma de porosidad mixta.

Mediante este método se pueden conseguir espumas con densidades relativas menores al 10% de forma económica (Fig. 2.9).

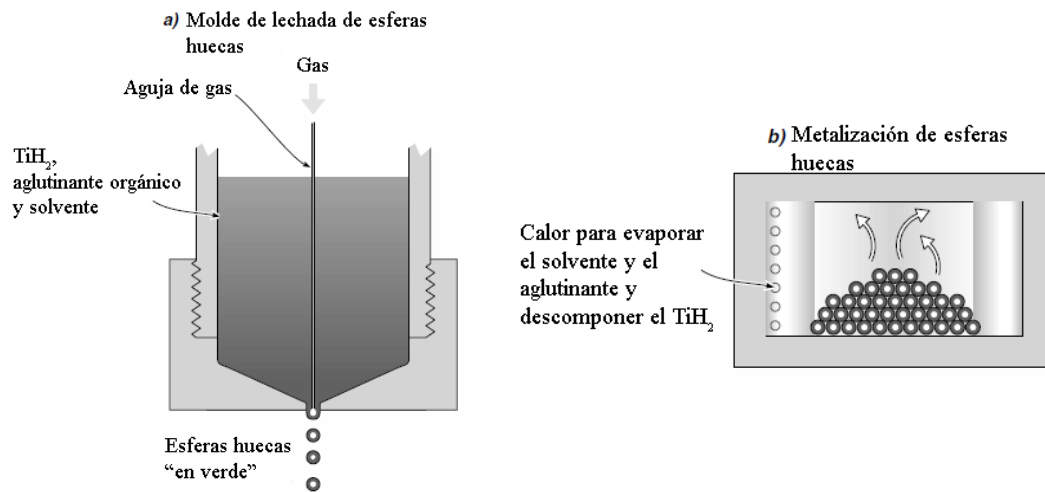


Fig. 2.9. Esquema de sinterización de esferas huecas [8].

2.4 Aplicaciones

Las espumas metálicas debido a su alto rango de densidades y, en consecuencia, a su gran rango de propiedades, proporcionan múltiples aplicaciones, algunas todavía bajo investigación. Las aplicaciones son de diversos tipos: desde estructurales a térmicas o sonoras. Varios artículos han tratado este tema [10-12]. Algunas de esas aplicaciones se detallan a continuación.

Son materiales que por su baja densidad frente a sus altas propiedades mecánicas son especialmente útiles para ser usados en estructuras ligeras, pues al poder variar sus propiedades con la porosidad se puede contener fácilmente el peso frente a la resistencia buscada. Por ejemplo, se han reportado usos en brazos-grúa donde se precisa ligereza para moverlo y resistencia mecánica para soportar los esfuerzos.

También se usan en amortiguación mecánica y de ruido. Se estima que su capacidad de absorción de vibraciones mecánicas es hasta 10 veces superior a la de una lámina del metal del mismo material debido a su menor rigidez [13].

Las espumas metálicas de poros abiertos se usan en intercambiadores de calor, pues permiten el paso de un fluido y además, al ser metal, posee una gran capacidad de disipar calor (Fig. 2.10).



Fig. 2.10. Intercambiadores de calor de ERC materials & aerospace [14].

La geometría de determinadas espumas metálicas de poros abiertos hace que también sean óptimas para labores de filtrado, pues permiten el paso del fluido entre los numerosos recovecos, reteniendo las partículas no deseadas.

En la industria biomédica las espumas metálicas de titanio son usadas en implantes, rellenos y reconstrucción de huesos al ser biocompatibles. Además, permite el crecimiento óseo y el traslado de fluidos sobre la espuma por la condición de poros abiertos que suelen tener las espumas de titanio.

Una de las primeras aplicaciones que surgió para estos materiales es la de almacenamiento de líquidos. Por ejemplo, para cojinetes autolubricados el aceite se almacena en una espuma de aluminio y va saliendo para reemplazar el usado (Fig. 2.11).



Fig. 2.11. Cojinete hecho de espuma de aluminio [15].

Debido a estas aplicaciones, industrias de transporte como la automoción, la ferroviaria, la naval y la aeroespacial estudian la implantación de las espumas metálicas. Estos sectores tienen en común la necesidad de reducción de peso para ahorrar combustible sin comprometer la resistencia y la seguridad.

En concreto en la automoción se buscan sistemas ligeros de seguridad que absorban la mayor cantidad de energía, por lo que estos materiales son útiles en elementos existentes, como por ejemplo las cajas de impacto o los paragolpes. Del mismo modo, varios trenes

incorporan absorbedores de impacto hechos con espumas metálicas para la absorción de energía y evitar así roturas en la estructura del tren (Fig. 2.12).

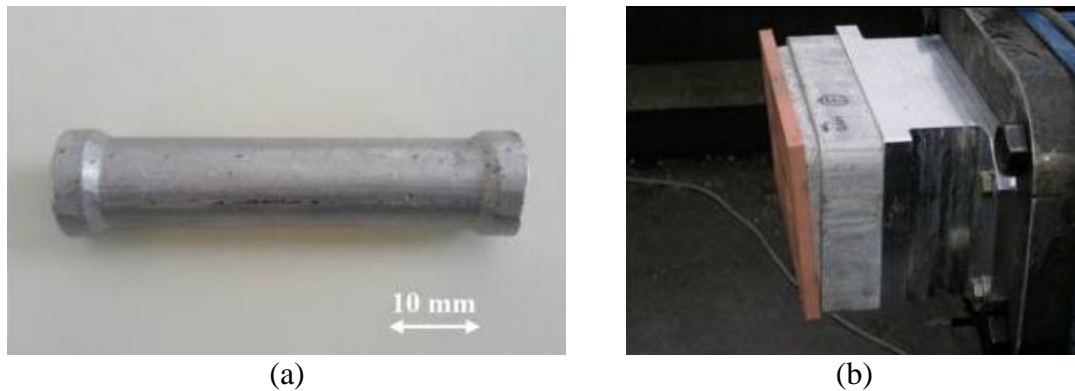


Fig. 2.12. Absorbedor de impactos de (a) un Audi Q7 y (b) de un tren [10].

Además, la función de absorbedor de impactos junto con sus propiedades ignífugas y de peso contenido hacen que en la industria militar se usen como capa del recubrimiento del blindaje de vehículos de combate.

También son usadas en el sector de la construcción debido a sus buenas propiedades de resistencia al fuego y aislamiento acústico. Ejemplo de ello es la cafetería Baluarte, en Pamplona, cuyo techo son láminas de espuma de aluminio (Fig. 2.13).



Fig. 2.13. Cafetería Baluarte, en Pamplona.

3. MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA

Se requiere conocer el módulo de Young y la distribución de tensiones de las espumas metálicas en función de su densidad relativa. Asimismo, se ha de estudiar también la influencia del tamaño y tipo del poro en los resultados.

Para ello, se modelizarán distintas espumas metálicas con distinta densidad relativa y distinto tamaño y distribución de poros, que serán sometidas a simulaciones de ensayos de compresión.

Este proyecto puede ser afrontado mediante el método de los elementos finitos, haciendo uso del programa comercial Abaqus/CAE. El método de los elementos finitos es una herramienta de resolución por métodos numéricos que proporciona una solución aproximada en base a la discretización seleccionada. Es útil para problemas con cargas irregulares o geometrías complejas, como en este caso.

En primer lugar, se debe seleccionar un dominio a discretizar sobre el que obtener los resultados. Sobre este dominio se aplicarán las condiciones de contorno y las cargas externas para una correcta modelización del problema a estudiar.

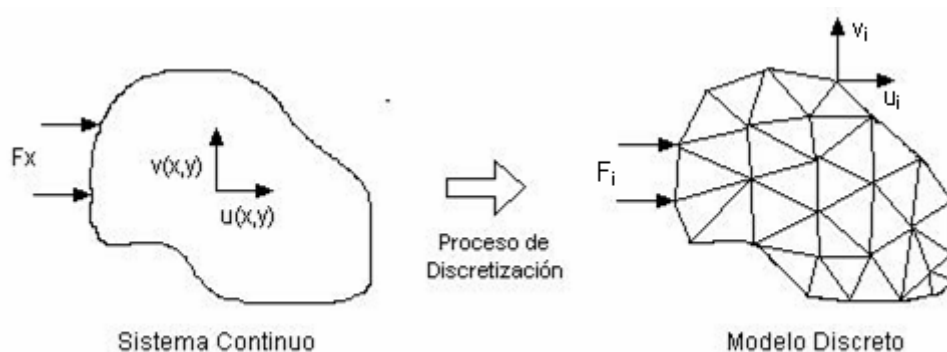


Fig. 3.1. Ejemplo de discretización de un sistema continuo mediante el método de elementos finitos. [16]

En este caso, la generación y discretización de dichos dominios, así como aplicación de cargas y condiciones de contorno, son altamente repetitivos por lo que es factible programar un código que permita automatizar este proceso. Esto se trata también en este capítulo.

La discretización es parte fundamental del método, pues el resultado depende de él. El objetivo es conseguir un equilibrio entre resultados óptimos y tiempo de cálculo, es decir, es necesario realizar un análisis del mallado que proporcione una solución convergida en el mínimo tiempo.

También se deberán estudiar las condiciones de contorno de la simulación, puesto que al ser un modelo a escala microscópica los resultados pueden no ser válidos para la escala macroscópica, por lo que se precisan condiciones de contorno para homogeneizar el dominio.

3.1 Generación y discretización del dominio

En primer lugar, se debe seleccionar un dominio de cálculo. Se requieren hacer simulaciones de ensayos de compresión en espumas metálicas variando su densidad relativa ρ/ρ_0 . Por lo tanto, se parte de que el dominio es una espuma metálica de cualquier densidad y tamaño.

Para la realización de estas simulaciones es preciso disponer de un volumen elemental representativo (conocido como RVE, por su acrónimo en inglés) que, por lo general, representan la microestructura del elemento a simular. La principal característica es que se puedan obtener las propiedades mecánicas del conjunto mediante esta pequeña fracción de volumen del material (Fig. 3.2).

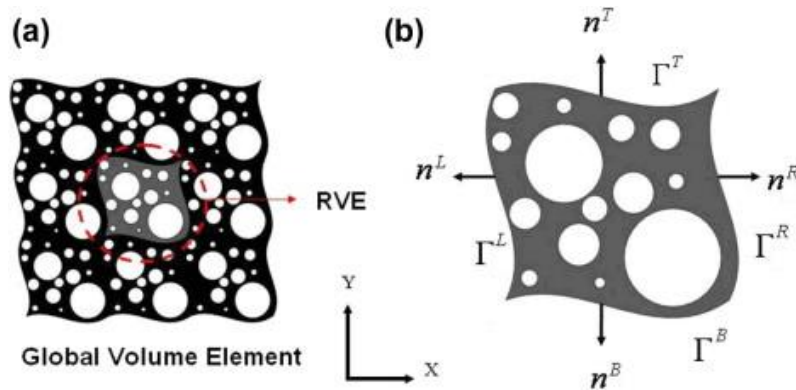


Fig. 3.2. Ejemplo de volumen elemental representativo de un conjunto [17].

Si el medio de estudio es un material periódico se puede seleccionar un poro o celda unitaria como volumen elemental representativo. No obstante, las espumas metálicas generalmente implican una distribución de poros aleatoria, por lo que si se escoge como volumen representativo una celda unitaria las propiedades microscópicas y macroscópicas pueden no coincidir. Por ello, para este caso es preferible seleccionar un volumen elemental representativo que contenga suficientes microestructuras, de tal forma que las propiedades no dependan del tamaño o número de poros. Se hará un estudio para elegir el tamaño óptimo.

La forma del elemento de volumen representativo elegida es un cubo, que hará de metal base, sobre el que se vaciarán esferas, que harán de poro, mediante una distribución aleatoria.

Cabe recalcar que los poros de las espumas metálicas no son esferas perfectas y que presentan diferentes tamaños de poro dentro de un mismo espécimen. Para simplificar y disminuir la complejidad y, por tanto, el tiempo de cálculo, se supondrá un tamaño medio de poro con forma esférica, puesto que en caso contrario se deberían generar tantas esferas como tamaños se deseen, lo que implicaría un alto coste computacional.

La variación de la densidad relativa se conseguirá aumentando el número de esferas dentro del cubo.

$$\frac{\rho}{\rho_o} = \frac{V_{cubo} - V_{esferas}}{V_{cubo}} = \frac{L^3 - \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 N_e}{L^3} \quad (3.1)$$

Donde

- L es el lado del cubo.
- d es el diámetro del poro.
- N_e es el número de esferas. Nótese que el número de esferas no tiene porqué ser un número entero.

Se ha de tener en cuenta que el tamaño de poro puede afectar a las propiedades mecánicas, como sucede en los ensayos reales, donde se recomienda que la muestra a ensayar exceda en torno a 7 veces el diámetro de poro [18]. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y que no hay un diámetro de poro típico en las espumas metálicas, sino que suelen ser del orden del milímetro, generalmente entre 0.1 mm y 5, mm pudiendo llegar hasta 25 mm según la aplicación y la técnica de fabricación usada, el dominio cúbico oscilará en función de la espuma metálica que se quiera obtener. Por tanto, el lado del cubo L , dependerá de la relación del diámetro típico de poro de la espuma d . El valor de L/d que caracterizará las muestras será estudiado más adelante.

El siguiente aspecto a considerar en el dominio, una vez elegida la forma base de la espuma, es la distribución de poros dentro de ésta. Como se mencionó anteriormente, la forma en la que se distribuyen y el tipo de los vacíos dentro del material afecta de forma

significativa a las propiedades mecánicas. Así pues, se debe diseñar una distribución en función de si los poros del material son abiertos o cerrados.

Para ambos tipos de espuma metálica, de poros abiertos o cerrados, se ha optado por el uso de una distribución aleatoria de poros, cuyos centros geométricos podrán estar presentes en una región 0.375 veces el diámetro del poro sobre la superficie del cuerpo base, además de dentro de éste (Fig. 3.3). De esta forma se obtendrán modelos con vacíos realistas.

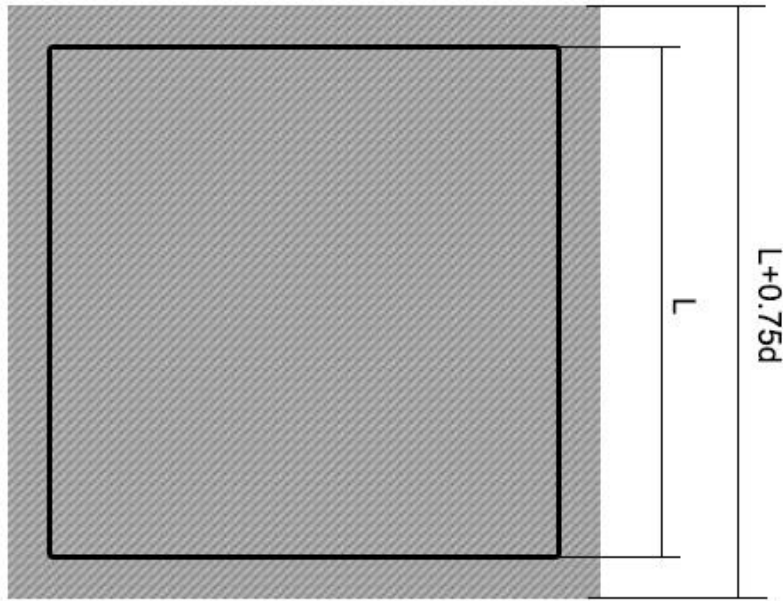


Fig. 3.3. Alzado de la probabilidad del centro geométrico de cada poro en comparación al cubo base.

Según se quiera caracterizar una espuma de poros abiertos o cerrados variarán las condiciones de la distribución de poros dentro de la muestra y, por tanto, habrá que estudiarlas por separado.

Antes se ha de definir la distancia entre poros (dp) en función de las coordenadas del centro en coordenadas cartesianas de dos esferas, i y j .

$$dp = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (3.2)$$

3.1.1 Distribución de poros en espumas metálicas de poros abiertos.

Para el caso de espumas metálicas de poros abiertos se han probado dos propuestas de diseño. La primera y más inmediata es que no se impondrá ninguna condición sobre la distribución aleatoria, puesto que interesa que los poros interactúen entre ellos.

Bajo estas condiciones se puede llegar a porosidades de en torno al 70%. Por encima de este valor de porosidad, mediante este método, existe el riesgo de que los cortes de las esferas acaben separando el cuerpo base en distintos fragmentos (Fig. 3.4). Esto supone que la porción de material separada no contribuye a la rigidez, obteniéndose valores erróneos.

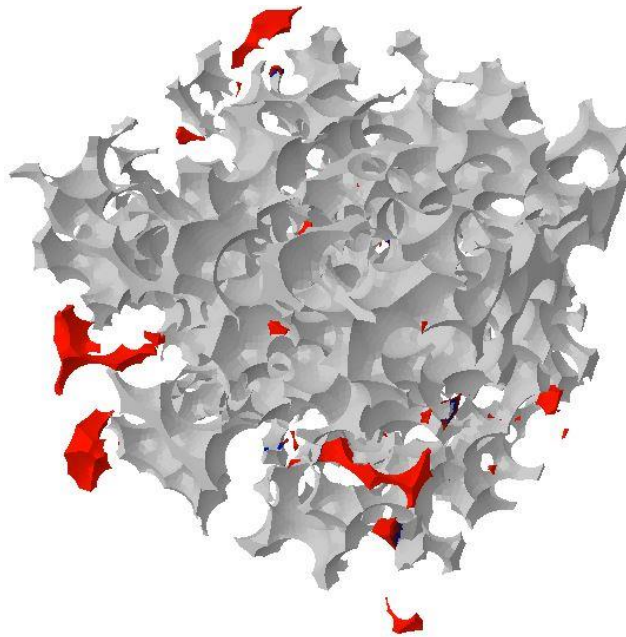


Fig. 3.4. Detalle de separación de fragmentos en rojo del cuerpo principal para una porosidad del 90%.

Con el fin de evitar esto se ha propuesto un modelo de distribución de poros aleatoria que permita un máximo de un 40% de inclusión sobre la distancia entre centros de los poros. De esta forma se elimina la posibilidad de que demasiados poros se congreguen en una región del espacio y que dividan la muestra. Mediante este método se han llegado a obtener espumas de hasta un 80% de porosidad.

Por lo tanto, se impondrá la condición de que la distancia entre poros dp sea mayor de 0.6 veces el diámetro d .

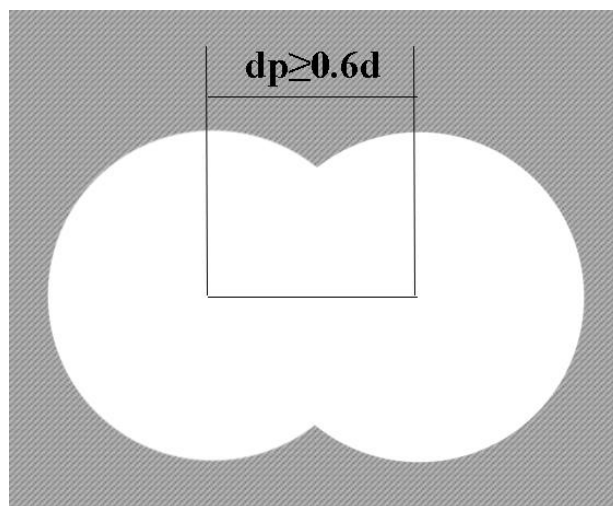


Fig. 3.5. Mínima distancia entre poros para espumas metálicas de poros abiertos.

3.1.2 Distribución de poros en espumas metálicas de poros cerrados.

Si lo que se quiere es modelizar una espuma metálica de poros cerrados se deberá imponer la condición de que los poros no interactúen entre ellos. Así pues, el centro geométrico de cada poro deberá estar a una distancia dp de los otros centros superior al diámetro de poro d .

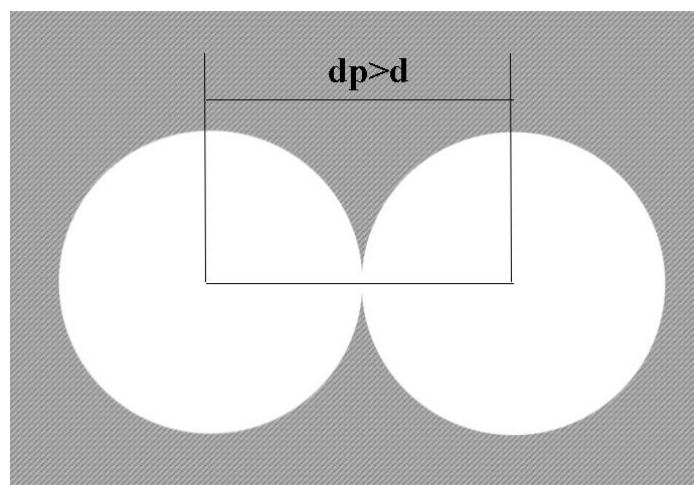


Fig. 3.6. Mínima distancia entre poros para espumas metálicas de poros cerrados.

Con este método se consiguen modelos de porosidades de hasta el 35%. El hecho de evitar que los poros generados aleatoriamente puedan superponerse, como en el caso de poros abiertos, hace que no se pueda alcanzar mayor porosidad. Una solución podría ser la generación de esferas de menor tamaño una vez alcanzado este límite pero, como se comentó anteriormente, conllevaría un alto coste computacional.

A continuación, se comparan, para una densidad relativa del 70% y un diámetro de poro de 2 mm, dos espumas de 1 cm de lado, generadas con ambos algoritmos: una de poros

abiertos y otra de poros cerrados. Se representan los modelos con un corte a un octavo para una mejor visualización (Fig. 3.7).

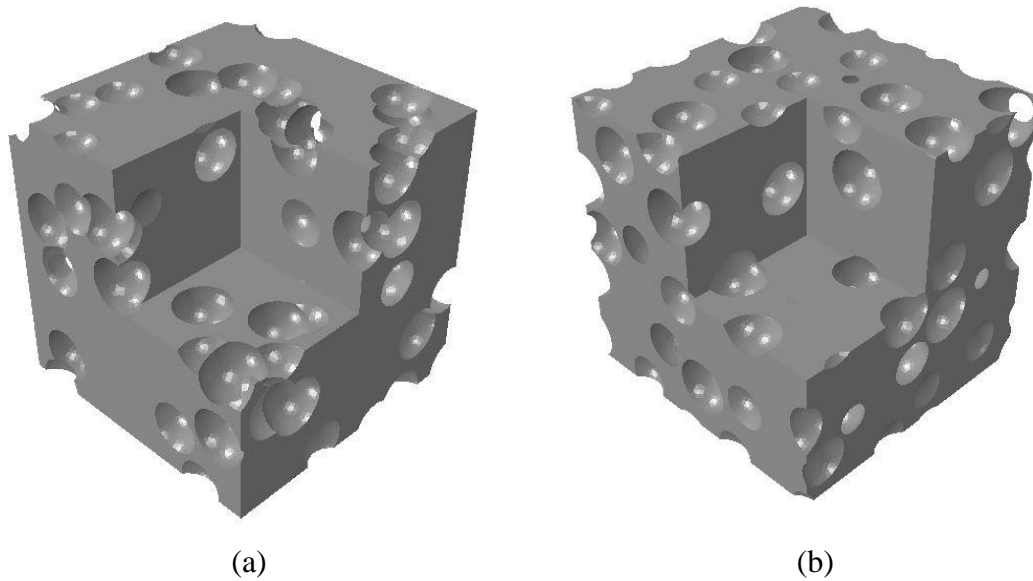


Fig. 3.7. Comparativa de corte a un octavo entre generación de espuma de poro abierto (a) y otra de poro cerrado (b) para un 30% de porosidad.

3.2 Condiciones de contorno

El hecho de que haya que seleccionar un elemento representativo de volumen de tamaño microscópico como forma de simular el conjunto implica que se deberán tomar unas condiciones de contorno tales que la simulación a esta escala represente las propiedades reales del material. Información al respecto de este tema se puede encontrar en [19].

Existen diversas maneras de transformar las propiedades microscópicas obtenidas con el volumen elemental representativo a escala macroscópica, que son las propiedades que interesan conocer. A esta conversión se le llama homogeneización.

El método de homogeneización más usado es la condición de contorno periódica, que es válida para cualquier estado de carga sobre el volumen elemental representativo. Como su nombre indica, esta condición simula que el volumen está rodeado de otros volúmenes iguales al simulado mediante condiciones de contorno. Esto se consigue mediante la compatibilidad de desplazamientos entre las caras del volumen a simular (Fig. 3.8).

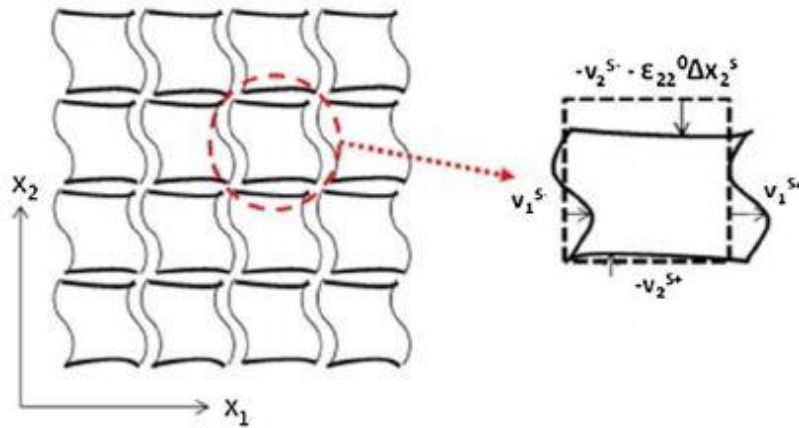


Fig. 3.8. Ejemplo de condición de contorno periódica para una deformación (ϵ_{22}) en dirección negativa al eje X_2 [20].

Es un método que, pese a que acepta cualquier estado de carga, exige un alto coste computacional al deber programarse la compatibilidad de desplazamientos entre las distintas caras para simular un medio homogéneo.

Si se cumplen unas determinadas condiciones, como alternativa al método de condición de contorno periódica, se puede usar la condición de contorno simétrica. Es una técnica de homogeneización que se puede usar para volúmenes elementales representativos cuadrados o rectangulares. No obstante, solo es válida para estados de cargas uniformes sobre direcciones normales a las caras, como en este trabajo.

Este método restringe el movimiento de las caras en dirección normal a éstas, simulando una situación de 8 volúmenes simétricos respecto de tres planos de simetría (Fig. 3.9).

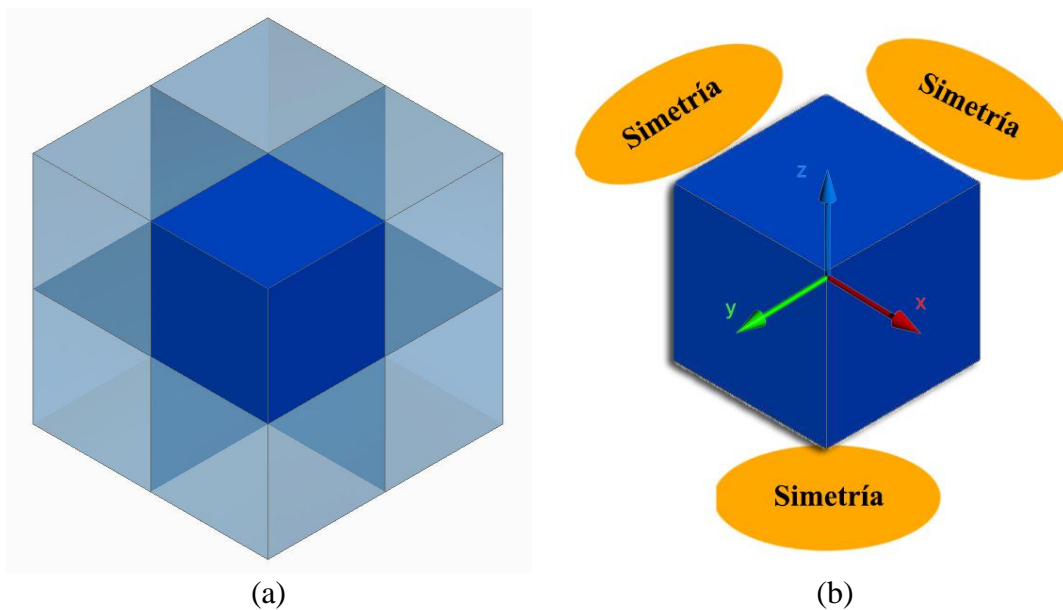


Fig. 3.9. (a) Representación del dominio de homogeneización para condición de contorno simétrica para un volumen cúbico. (b) Simplificación en planos de simetría del dominio de homogeneización.

A diferencia de la condición de contorno periódica, la condición de contorno simétrica tiene un coste computacional bajo y es de sencilla aplicación, pues es directa. Consiste en la restricción del desplazamiento de las caras coincidentes con los planos de simetría en dirección normal a estos planos.

Así pues, se usará la condición de contorno simétrica para obtener propiedades macroscópicas del material mediante una muestra microscópica.

Por último, se impondrá la condición que simulará un ensayo a compresión. En un ensayo de compresión real, el espécimen del que se quieren obtener las propiedades está en contacto con la máquina en la parte inferior mediante el cabezal fijo, que como su propio nombre indica, permanece quieto y sirve de sujeción, y por la parte superior mediante el cabezal móvil, que es aquel que se mueve en sentido descendente comprimiendo el material.

Para simular la acción del cabezal móvil se aplicará un desplazamiento (U_z) sobre la cara superior que implique una deformación del 1%. Se ha elegido este desplazamiento porque se pretende hallar el módulo de Young y para ello se ha de elegir un punto de desplazamiento dentro de la zona elástica del material. El análisis será estático, es decir, independiente del tiempo.

Se exponen a modo de resumen y para mayor claridad las condiciones de contorno que se aplicarán al modelo en forma de tabla (Tabla 3.1) y de esquema (Fig. 3.10).

TABLA 3.1. CONDICIONES DE CONTORNO.

	Plano	Condición de contorno
Desplazamiento	$Z = L$	$U_z = -0.01L$
Simetría XY	$Z = 0$	$U_z = 0$
Simetría XZ	$Y = 0$	$U_y = 0$
Simetría YZ	$X = 0$	$U_x = 0$

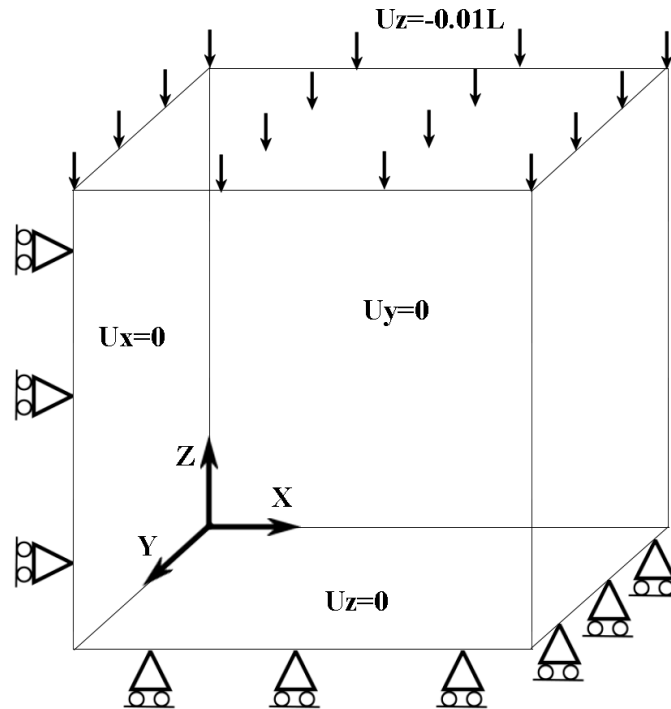


Fig. 3.10. Esquema de las condiciones de contorno.

3.3 Mallado

El método de elementos finitos implica una discretización del dominio continuo en elementos que pueden tomar distintas formas y tamaños. La selección de estos parámetros es fundamental para obtener resultados válidos.

El tamaño del elemento óptimo se estudiará más adelante en el análisis de malla, pues depende altamente de la muestra a considerar debido a la gran diferencia del rango de tamaños de poros en las espumas metálicas según el espécimen, variando desde un tamaño del orden de micrómetros a milímetros. Por ello, es preciso realizar un estudio detallado de este aspecto más adelante, una vez se haya descrito la forma de obtener los resultados.

En este apartado, por lo tanto, se realizará un estudio de la forma del elemento para discretizar el dominio.

Son varias las formas geométricas que se pueden usar para la discretización del dominio, como prismas, bloques, pirámides y tetraedros (Fig. 3.11).

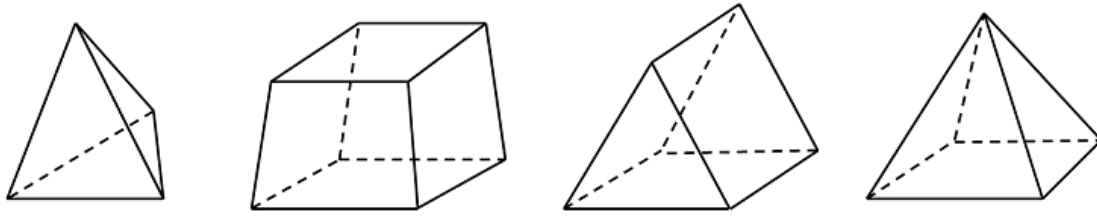


Fig. 3.11. Ejemplo de elementos de discretización en el método de elementos finitos [21].

No todas las formas ofrecen el mismo resultado ni la misma convergencia, por lo que es preciso seleccionar la que mejor se adapte a nuestros requerimientos para simular espumas metálicas.

En primer lugar, hay que recordar que la simulación es de tipo mecánico y que se quieren obtener valores de tensiones en función de desplazamientos.

En cuanto al modelo a simular, como ya se comentó anteriormente, es un cubo con vaciados esféricos distribuidos de forma aleatoria y que pueden ser o no ser superpuestos, en función del tipo de espuma de la que se quiera obtener las propiedades mecánicas. Esto significa que la geometría a simular puede ser altamente irregular. Esta característica implica que se han de descartar los elementos de forma prismática, de bloque y piramidal, debido a que son formas geométricas muy concretas y no son aptas para discretizar cualquier dominio, como en este caso. La forma geométrica a usar será, por lo tanto, la tetraédrica, que proporciona una gran versatilidad.

Dentro de una misma forma geométrica el programa da a elegir entre diferentes configuraciones en función del número de nodos. Para el elemento tetraédrico, el programa ofrece una versión de 4 nodos nombrada como C3D4, coincidentes con los vértices de la figura, y otra de elementos cuadráticos con 10 nodos llamada C3D10, donde, a parte de los nodos en los vértices se añaden nodos en el punto medio de los lados (Fig. 3.12).

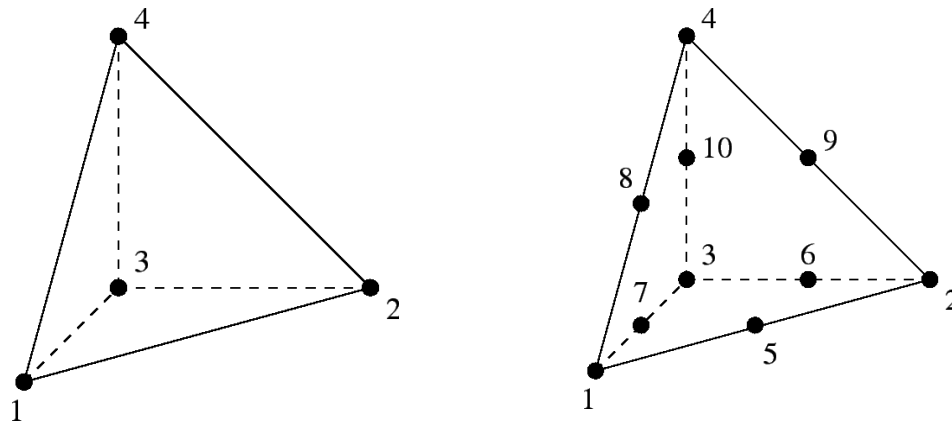


Fig. 3.12. Diferencia entre el elemento C3D4 y el C3D10 [22].

El tetraedro de 4 nodos usa una interpolación lineal, por lo que converge muy lentamente y se precisan mallas con un gran número de elementos para obtener el resultado válido. El tetraedro de 10 nodos usa una interpolación cuadrática que converge de forma más rápida para un menor número de elementos [22]. Por ello, el elemento seleccionado es el tetraedro de 10 nodos, el C3D10.

3.4 Programación del algoritmo

Debido a la alta repetibilidad en la generación del dominio resulta altamente programable, de forma que mediante la ejecución de un código informático y dando unos datos de partida se genere geoméricamente la espuma, se apliquen propiedades de los materiales, se asignen las condiciones de contorno, se malle y se lance la simulación de forma automática.

En concreto, Abaqus/CAE acepta archivos que contengan un código en el lenguaje de programación Python.

La principal característica de Python es que es un lenguaje interpretado, es decir, que convierte el código a lenguaje máquina a medida que se ejecuta, pues no necesita un compilador para el procesamiento del código y que es de código abierto.

Todas las acciones del programa Abaqus se guardan automáticamente de forma temporal en un archivo con el código usado, por lo que su obtención es sencilla para la posterior programación. De esta forma se generará un archivo que contenga el código que ejecuta el programa para automatizar el proceso. En primer lugar, se deben introducir las variables de las que se parte y que se deben asignar manualmente. Estas se dividen en propiedades geométricas como la densidad relativa ρ/ρ_0 , el diámetro de poro d y el lado de la espuma L , y en propiedades del material como el módulo de elasticidad E_0 , el

coeficiente de Poisson ν y la densidad ρ_0 . Se deberá asignar también un tamaño de elemento para la discretización.

Una vez se han definido esas variables el código generará la espuma de tal forma que se cumpla la geometría requerida. Después se le asignarán las propiedades del material y se aplicarán las condiciones de contorno. Una vez hecho esto se mallará y se lanzará la simulación.

Se muestra el diagrama de flujo del código para la automatización de las simulaciones (Fig. 3.13).

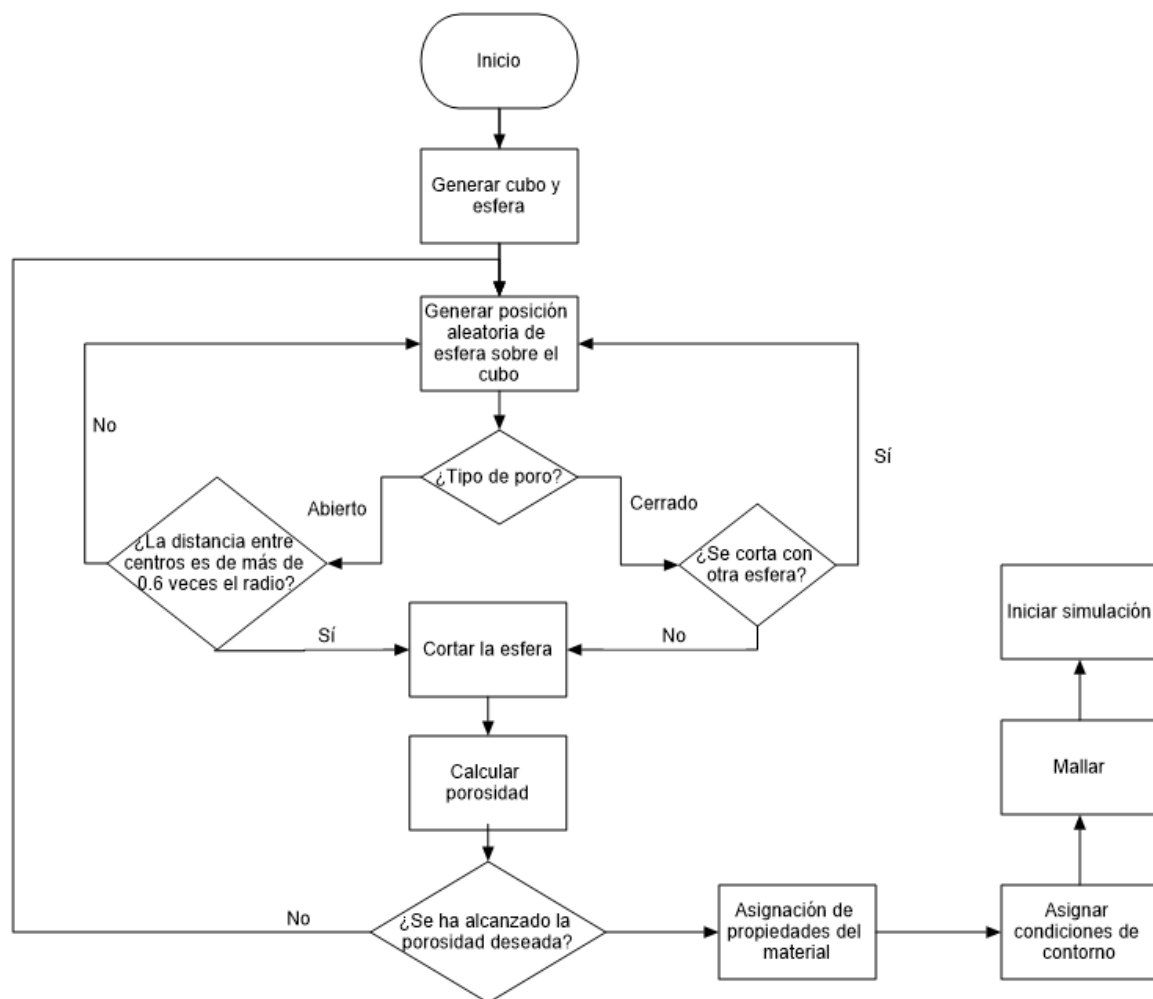


Fig. 3.13. Diagrama de flujo del código usado para la automatización del problema.

4. PROBLEMA A RESOLVER

4.1 Módulo de Young

Se precisa conocer el valor del módulo de elasticidad de las espumas metálicas en función de la densidad relativa simuladas mediante el método de elementos finitos para comparar los resultados con la literatura. De esta forma se podrá validar el modelo.

El módulo de Young se define mediante la ley de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

Siendo

- E es el módulo de elasticidad o de Young. Representa la relación entre el incremento de tensión y de deformación en una dirección.
- σ es la tensión aplicada.
- ε es la deformación que sufre el material en la dirección de aplicación de la tensión.

Para el cálculo del módulo de elasticidad se necesita conocer el valor de la deformación aplicada y la tensión necesaria para conseguir dicha deformación.

Como se explicó en el apartado de condiciones de contorno, se parte de un valor de deformación de un 1%. La deformación se define como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0.01L}{L} = 0.01 \quad (4.2)$$

Siendo

- ΔL el desplazamiento del material inducido por las condiciones de contorno.

La deformación tiene valor de 0.01 para cualquier valor de lado de la espuma metálica.

Se necesita la tensión aplicada en el material, pero Abaqus/CAE no permite obtener este valor de forma directa, por lo que se ha de recurrir a la definición de tensión.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{L^2} \quad (4.3)$$

Siendo

- F es la fuerza aplicada con misma dirección y sentido a la deformación antes descrita.
- A es el área transversal a la dirección de aplicación de la fuerza.

Si se hace un análisis de fuerzas del modelo simulado (Fig. 4.1) se obtiene una reacción de igual módulo y dirección sobre la cara inferior, pero de sentido contrario a la aplicada en la cara superior. Abaqus/CAE calcula esta reacción y permite generar los resultados.



Fig. 4.1. Diagrama de fuerzas para el modelo simulado.

Se recuerda que el modelo es discreto y que para obtener la fuerza total se han de sumar las fuerzas sobre los nodos de los elementos que componen esta discretización de la cara inferior, de forma que se obtiene la tensión como:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{L^2} \quad (4.4)$$

Siendo R_i la reacción vertical del nodo i sobre la cara inferior de la espuma y n el número de nodos en esa cara.

De esta forma, el módulo de Young de cualquier espuma metálica simulada mediante este método queda definido. Para obtener el valor del módulo de Young adimensional y comparar distintos materiales basta con dividir el valor del módulo de Young de la espuma entre el módulo de Young del material de partida (E/E_0).

4.2 Tensión de Von Mises

Otro parámetro que interesa obtener es la tensión equivalente de Von Mises (σ_{VM}) en cada punto para poder estudiar la distribución de tensiones a lo largo de la espuma metálica en función del tipo de poro y de la densidad relativa.

La tensión de Von Mises proporciona un valor de la energía de distorsión y se define en función de las tensiones como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}{2}} \quad (4.5)$$

Habitualmente se usa como criterio de fallo para materiales dúctiles.

El programa calcula automáticamente este valor para cada elemento, por lo que su obtención es automática.

4.3 Análisis de sensibilidad de la malla

El método de elementos finitos se basa en la técnica de discretización de un dominio continuo en elementos discretos, como ya se comentó anteriormente. La solución es dependiente de esta discretización, por lo que ha de ser estudiada con especial interés.

A menor tamaño de elemento de la discretización mayor número de elementos y, por tanto, mayor número de ecuaciones a resolver y mayor tiempo de simulación. Por eso es muy importante realizar un estudio de sensibilidad de la malla, de forma que se obtenga una solución convergida empleando el menor tiempo posible.

El hecho de que el dominio de cálculo de una espuma metálica varíe según el tamaño de poro supone que no se puede conocer con antelación las dimensiones geométricas exactas. Este hecho incide directamente en el tamaño de elemento de la malla, puesto que dependerá del tamaño de la muestra.

A modo de ejemplo, no es lo mismo estudiar una espuma de aluminio con poros de 5 mm de diámetro medio que una espuma de titanio con poros de 0.3 mm de diámetro medio. En el caso del aluminio es posible que se necesite simular una muestra cúbica de 25 mm de lado mientras que para el titanio podría bastar con 1.5 mm de lado.

El objetivo es, por tanto, encontrar un tamaño de elemento adimensional en función del tamaño del lado de la espuma a simular, sobre el que se obtengan los resultados convergidos. Esto es debido a que la geometría de las diversas espumas generadas sigue el mismo patrón, pero el tamaño puede ser distinto.

Se definirá el tamaño de elemento adimensional como la relación entre el tamaño de elemento de mallado entre el lado de la espuma metálica.

Esta relación de tamaño de elemento nos dará un número adimensional que multiplicado por el lado de la espuma, que será conocido, se obtendrá el tamaño de los elementos tetraédricos necesario para obtener una malla convergida en función del tamaño de cada espuma.

Para hallar este número se ha modelizado una espuma metálica de poros abiertos, con un 40% de porosidad y de 1 mm de lado sobre la que se ha extraído el módulo de Young adimensional para distintos tamaños de elementos. También se ha graficado el tiempo que se ha empleado en cada simulación (Fig. 4.2).

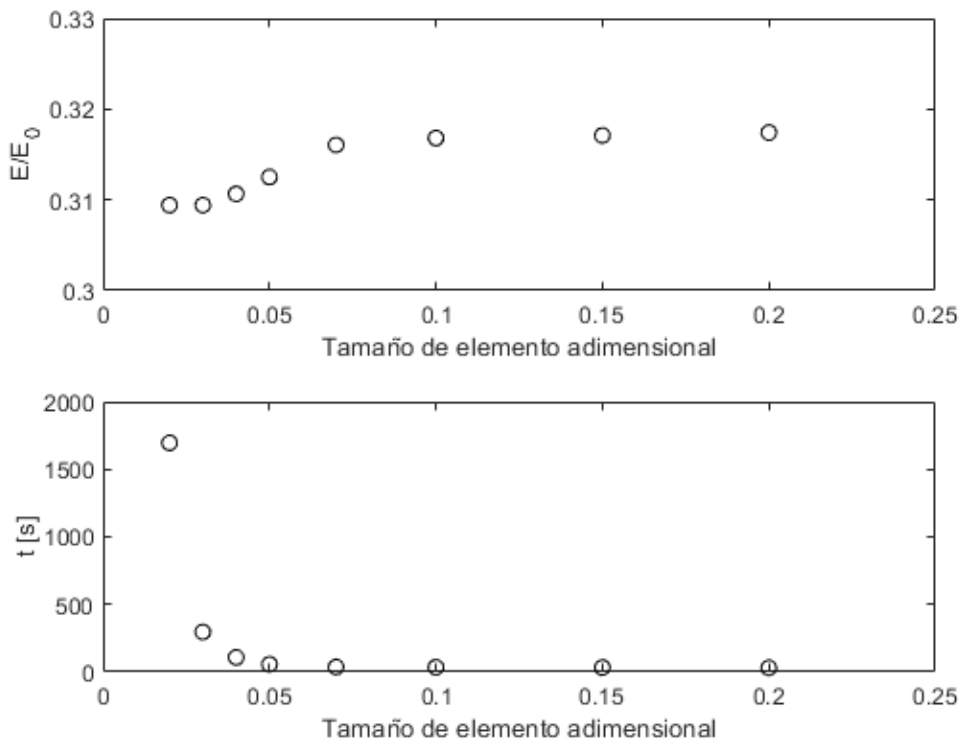


Fig. 4.2. Variación del módulo de Young adimensional y del tiempo de simulación para una espuma metálica con un 40% de porosidad en función tamaño de elemento adimensional.

Se observa que la malla converge para un tamaño de elemento adimensional de 0.03, por lo que este será el valor al que habrá que multiplicar el lado de la espuma para obtener una malla óptima para cualquier tipo de dimensión de la espuma.

Es importante observar también el tiempo de simulación, pues sigue una tendencia exponencial. Se observa la importancia de realizar este análisis. Para una malla más fina el tiempo de simulación puede ser 6 veces superior y el resultado sería el mismo, por lo que se habrán consumido más recursos de los necesarios.

4.4 Análisis del tamaño relativo entre espuma y diámetro de poro

Como se introdujo en la generación del dominio, el volumen elemental representativo no ha de depender del número de poros o de su tamaño, pues las propiedades que se obtengan de la simulación han de ser consistentes.

El objetivo es encontrar una relación entre el tamaño del lado de la espuma y el diámetro de poros contenidos en su interior. La importancia de este parámetro reside también en el tiempo de generación del dominio. Como es el número de vaciados de esferas el que hace variar la densidad relativa del modelo, cuanto mayor sea este número mayor será el tiempo empleado en esta acción. Es decir, si el lado de la espuma es demasiado largo y

los poros son demasiado pequeños, la generación del modelo tomará demasiado tiempo. Por el contrario, si el lado de la espuma es demasiado pequeño y los poros son demasiado grandes, los resultados obtenidos pueden no ser válidos [23].

Para estimar el tamaño óptimo se propone la relación entre el tamaño del lado de la espuma metálica L y el diámetro de poro d de forma adimensional con el fin de obtener un valor de L/d cuyos resultados sean estables.

Para realizar este análisis se ha usado una espuma de poros abiertos con un 40% de porosidad, con un tamaño de lado de 1 mm sobre la que se han comparado los módulos de elasticidad obtenidos en función de distintos tamaños de poros. Los resultados se muestran en forma adimensional (Fig. 4.3).

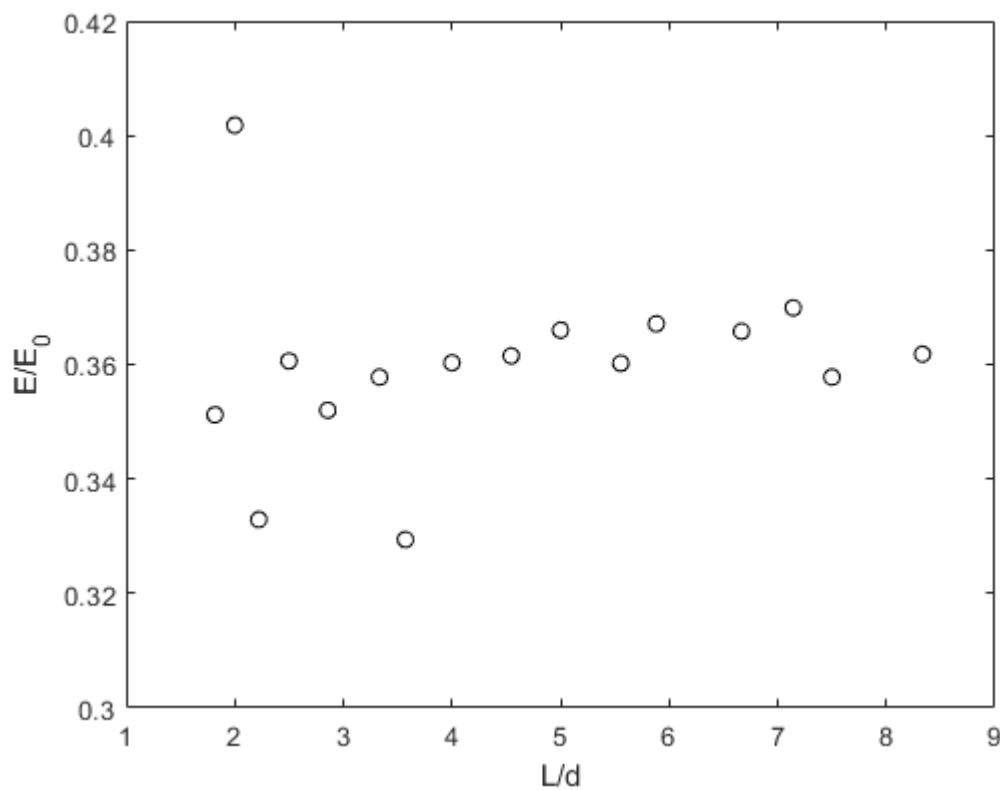


Fig. 4.3. Análisis del tamaño relativo entre el lado de la espuma metálica y el diámetro de poro.

Los resultados obtenidos concuerdan con la literatura, se observa que para L/d pequeños los resultados son inconsistentes y a medida que aumenta el valor se estabilizan. Los valores siguen una tendencia lineal, pero para relaciones de L/d menores de 4 pueden existir oscilaciones relativamente grandes de la medida que se quiere calcular.

Para las simulaciones se usará, por lo tanto, un valor de L/d de 5, que es un valor presente de la zona estable.

4.5 Propiedades de los materiales a simular

Con vistas a validar los resultados del diseño anteriormente expuesto, tanto para espumas metálicas de poros abiertos como cerrados, se simularán tres espumas metálicas diferentes con sus respectivas densidades relativas. Dos de las espumas serán de una aleación aluminio y la otra será de titanio puro.

Una espuma metálica de la aleación aluminio AlSi12 tendrá una configuración de poros abiertos y otra de poros cerrados. Ambas espumas tendrán el mismo tamaño de poro y, por tanto, el mismo tamaño de lado, pues se recuerda que se ha fijado un parámetro de L/d igual a 5 para las simulaciones con el fin evitar oscilaciones en la solución. Al ser espumas del mismo material, con el mismo tamaño de lado y de poros, se podrá hacer una comparación de la distribución de la tensión equivalente de Von Mises según el tipo de poro sea abierto o cerrado.

Para la modelización de la espuma se han de introducir los parámetros elásticos de la aleación de aluminio AlSi12, en concreto la densidad, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson obtenidas en [24]. En cuanto al tamaño de poro, en las espumas de aluminio, este parámetro suele oscilar entre 0.16 mm y 5 mm [25], aunque pueden llegar hasta 25 mm [2]. Por ello, se ha optado por usar un tamaño medio de 2 mm. Con este tamaño medio, se conoce el lado de la espuma a simular.

Se recuerda también que las simulaciones para poros abiertos pueden llegar a un 20% de densidad relativa, mientras que las de poros cerrados solo llegan a un 70% por cuestiones de diseño, como se mencionó anteriormente.

Se modelizará una espuma de titanio puro, de forma que se pueda validar el modelo de propiedades adimensional, al tener diferentes propiedades que el aluminio. De nuevo, para su modelización se necesita la densidad, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson del titanio que se obtendrán de [24].

Las espumas de titanio son típicamente usadas en aplicaciones biomédicas, concretamente en implantes, rellenos y reconstrucción ósea, donde los tamaños de poro del orden de entre 100 μm y 500 μm son preferibles para favorecer el crecimiento del hueso sobre la espuma metálica [26, 27]. Por ello, el tamaño de poro seleccionado será de 300 μm .

Como se mencionó anteriormente, la comparativa entre poros cerrados y abiertos vendrá dada por las simulaciones de las espumas de aluminio, no es necesario volver a hacer

ambos tipos de poros para el titanio, pues con este material se quiere validar el modelo para otras propiedades y tamaños. Por ello, y como son especialmente usados en aplicaciones biomédicas, se ha seleccionado una distribución de poros abiertos, esto es debido a que las espumas de poros cerrados no son adecuadas para estas aplicaciones, porque se requiere que haya transporte de fluidos en la espuma [28].

Se muestra a modo de resumen los parámetros de las tres series de simulaciones, necesarias para la validación del modelo numérico (Tabla 4.1).

TABLA 4.1. PARÁMETROS DE LAS SIMULACIONES A REALIZAR.

Material	Aluminio (AlSi12)
Densidad, ρ_0	2.66 g/cm ³
Módulo de Young, E_0	71 GPa
Coeficiente de Poisson, ν	0.33
Tamaño de lado de la espuma metálica, L	10 mm
Diámetro de poro, d	2 mm
Tipo de espuma metálica	Poros abiertos ($\rho/\rho_0=[0.9,0.2]$)

Material	Aluminio (AlSi12)
Densidad, ρ_0	2.66 g/cm ³
Módulo de Young, E_0	71 GPa
Coeficiente de Poisson, ν	0.33
Tamaño de lado de la espuma metálica, L	10 mm
Diámetro de poro, d	2 mm
Tipo de espuma metálica	Poros cerrados ($\rho/\rho_0=[0.9,0.7]$)

Material	Titanio (Ti)
Densidad, ρ_0	4.5 g/cm ³
Módulo de Young, E_0	116 GPa
Coeficiente de Poisson, ν	0.33
Tamaño de lado de la espuma metálica, L	1.5 mm
Diámetro de poro, d	300 μ m
Tipo de espuma metálica	Poros abiertos ($\rho/\rho_0=[0.9,0.2]$)

5. RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de las simulaciones de las distintas espumas metálicas y se compararán con la literatura y diversos ensayos experimentales.

Para obtener resultados lo más representativos posibles se han simulado tres veces cada una de las espumas para cada densidad relativa, de tal forma que se puede analizar estadísticamente el resultado.

Por tanto, como lo que se obtienen son un conjunto de medidas para un mismo valor, se calculará la media de los valores (\bar{x}) y se acompañará de la desviación típica (σ) que indicará la dispersión de los datos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (5.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (5.2)$$

Donde x es la propiedad física a estudiar y N el número de medidas tomadas.

Además, puesto que el gráfico que se obtiene es una dispersión de datos se ha de cuantificar cuanto se ajustan estos valores a las expresiones que rigen el comportamiento de la espuma metálica. Hay diversos métodos para obtener de forma objetiva este ajuste de los datos para una expresión determinada, pero el más usado es el coeficiente de determinación (R^2), definido como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión [29]. Oscila entre 0 y 1, cuanto más cercano esté de la unidad mejor será el ajuste a la expresión elegida.

5.1 Módulo de Young

Con vistas a comparar distintos materiales se analizará el módulo de Young adimensional E/E_0 , frente a la densidad relativa ρ/ρ_0 , donde se recuerda que el parámetro sin subíndice es la propiedad de la espuma y el parámetro con subíndice es la propiedad del material del que proviene la espuma.

Así pues, se presentan en forma de tabla los resultados de las tres series de espumas metálicas simuladas con las especificaciones anteriormente explicadas (Tabla 5.1), (Tabla 5.2), (Tabla 5.3).

TABLA 5.1. RESULTADOS MÓDULO DE YOUNG FRENTE A DENSIDAD RELATIVA DE ESPUMA DE ALUMINIO DE POROS ABIERTOS.

ρ/ρ_0	F [N]	E [GPa]	E/E ₀		
0.9	57485.6	57.486	0.806	±	0.009
	57823.0	57.823			
	56332.8	56.333			
0.8	44892.7	44.893	0.638	±	0.004
	45630.0	45.630			
	45460.4	45.460			
0.7	35605.0	35.605	0.485	±	0.012
	33990.0	33.990			
	33711.0	33.711			
0.6	25372.4	25.372	0.356	±	0.004
	25475.2	25.475			
	24897.3	24.897			
0.5	16403.5	16.404	0.229	±	0.004
	15821.9	15.822			
	16511.1	16.511			
0.4	9649.9	9.650	0.145	±	0.006
	10548.7	10.549			
	10602.8	10.603			
0.3	4801.4	4.801	0.066	±	0.002
	4843.2	4.843			
	4498.5	4.499			
0.2	1658.6	1.659	0.024	±	0.003
	1421.2	1.421			
	1984.5	1.985			

TABLA 5.2. RESULTADOS MÓDULO DE YOUNG FRENTE A DENSIDAD RELATIVA DE ESPUMA DE ALUMINIO DE POROS CERRADOS.

ρ/ρ_0	F [N]	E [GPa]	E/E ₀
0.9	57581.9	57.582	0.811 ± 0.001
	57690.6	57.691	
	57561.1	57.561	
0.8	45953.0	45.953	0.654 ± 0.006
	46472.9	46.473	
	46938.5	46.939	
0.7	36178.2	36.178	0.509 ± 0.002
	35977.6	35.978	
	36288.6	36.289	

TABLA 5.3. RESULTADOS MÓDULO DE YOUNG FRENTE A DENSIDAD RELATIVA DE ESPUMA DE TITANIO DE POROS ABIERTOS.

ρ/ρ_0	F [N]	E [GPa]	E/E ₀
0.9	2087.3	92.768	0.807 ± 0.005
	2112.4	93.882	
	2117.5	94.111	
0.8	1665.2	74.010	0.633 ± 0.006
	1659.2	73.744	
	1631.0	72.488	
0.7	1242.6	55.227	0.485 ± 0.006
	1280.1	56.895	
	1273.8	56.613	
0.6	883.6	39.272	0.353 ± 0.014
	911.7	40.521	
	969.1	43.073	
0.5	631.3	28.057	0.240 ± 0.004
	610.7	27.143	
	637.3	28.323	
0.4	355.8	15.814	0.136 ± 0.009
	381.4	16.951	
	326.2	14.498	
0.3	174.9	7.774	0.071 ± 0.005
	180.5	8.020	
	202.7	9.009	
0.2	61.3	2.725	0.023 ± 0.001
	57.9	2.572	
	62.3	2.767	

Para la espuma de aluminio AlSi12 de poros cerrados diversos estudios [30, 31] constatan la relación exponencial de 1.85 entre el módulo de Young adimensional y la densidad relativa.

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1.85} \quad (5.3)$$

Para el caso de las espumas de poros abiertos, tanto para el aluminio AlSi12 [32] como para el titanio [33-35], así como de forma general para todas las espumas metálicas de poros abiertos, como predijeron Gibson y Ashby [36], la relación entre el módulo de Young adimensional y la densidad relativa es exponencial de 2.

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 \quad (5.4)$$

A continuación, se muestran resultados de las simulaciones junto con las expresiones validadas experimentalmente (Fig. 5.1), así como el coeficiente de determinación entre los datos de las simulaciones y las expresiones experimentales (Tabla 5.4).

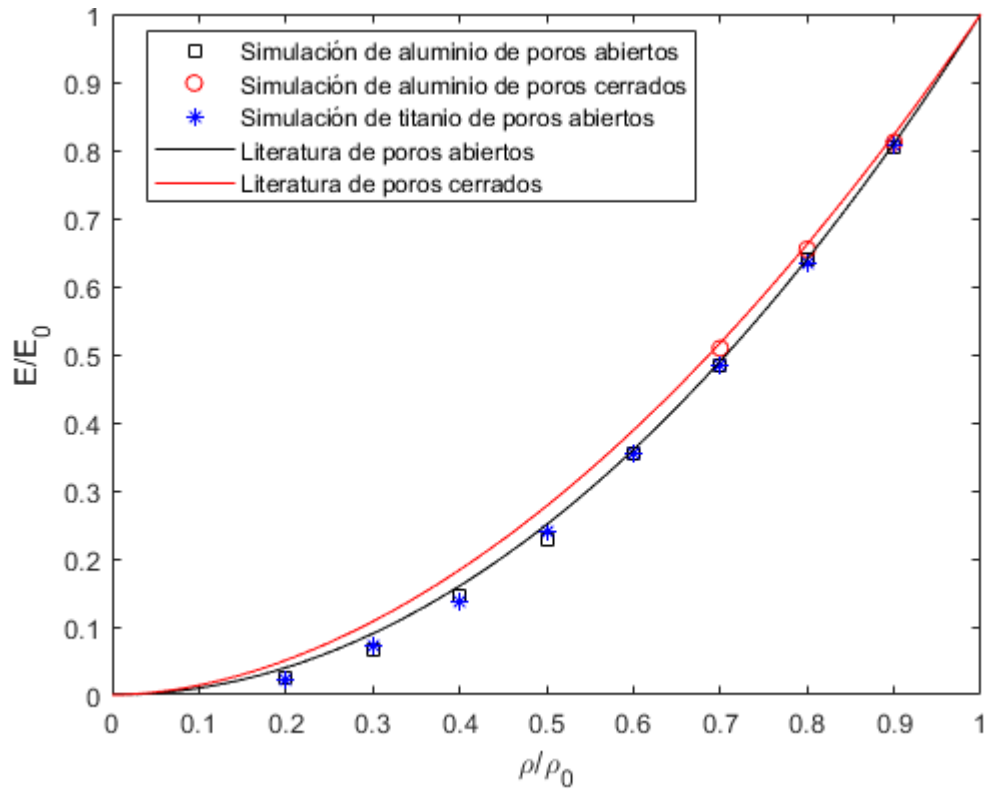


Fig. 5.1. Comparativa de resultados de las simulaciones con expresiones validadas en otros estudios.

TABLA 5.4. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN PARA LAS SIMULACIONES FRENTE A EXPRESIONES EXPERIMENTALES.

Simulación	Expresión	R ²
Espuma de aluminio de poros cerrados	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{1.85}$	0.9983
Espuma de aluminio de poros abiertos	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2$	0.9713
Espuma de titanio de poros abiertos	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2$	0.9712

Las simulaciones de aluminio de poros cerrados resultan acordes a los valores previstos en base a estudios experimentales, pues se sitúan sobre la línea de tendencia descrita para este caso, como además indica el coeficiente de determinación con un valor de 0.9983, muy cercano a la unidad, lo que refleja un buen ajuste de los datos.

En cuando a las simulaciones de poros abiertos, tanto para el aluminio como para el titanio, los valores se corresponden a la expresión de poros abiertos con gran precisión hasta un 60% de densidad relativa. Por debajo de ese valor los resultados obtenidos son ligeramente inferiores a los previstos. Objetivamente el ajuste para estas simulaciones también es bueno, pues el coeficiente de determinación en ambos casos es 0.971, cercano a la unidad.

Una explicación para obtener resultados inferiores a los experimentales para bajas densidades relativas puede deberse a fragmentos de material que se han desacoplado del resto del cuerpo de la espuma en la generación de los poros y que por tanto no están contribuyendo a la rigidez del material (Fig. 5.2). Se ha hecho un estudio para el caso de 20% de densidad relativa y se han calculado estas zonas desprendidas. Se ha obtenido que la fracción de volumen separado del cuerpo es de $4.27 \cdot 10^{-5} \%$, por lo que se descarta esta causa.

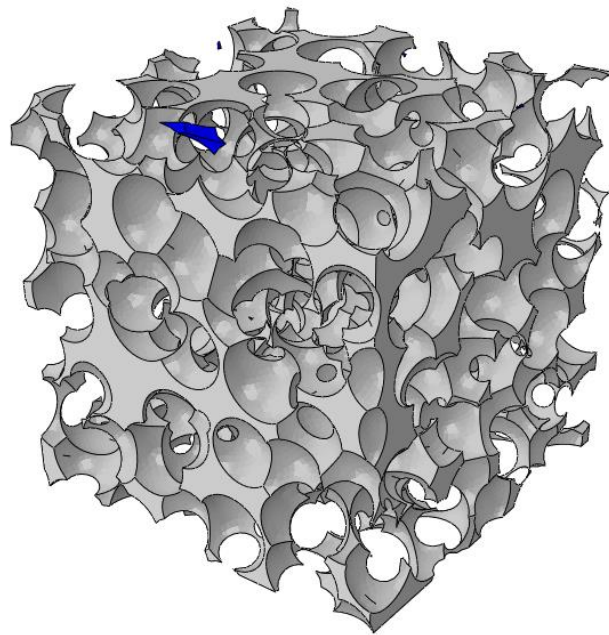


Fig. 5.2. Ilustración de partes separadas del cuerpo para una densidad relativa del 20%.

Otra posible causa es que, al ser casos con poco material debido a su alta porosidad, en diversas zonas se den casos de plastificación local en algunos puntos de la espuma, lo que conlleva un endurecimiento por deformación en dichos puntos, que podría aumentar sensiblemente el valor del módulo de elasticidad. Como en las simulaciones no se han tenido en cuenta criterios de plastificación, la totalidad del material se mantiene en régimen elástico y no se han tenido en cuenta este posible efecto de endurecimiento.

En general los resultados obtenidos mediante las simulaciones concuerdan con los estudios experimentales para cualquiera de los casos estudiados y son especialmente acordes para casos de altas densidades relativas.

5.2 Distribución de tensiones en función del tipo de poro

Como se comentó anteriormente, se va a comparar la distribución de tensiones en las simulaciones de aluminio para las densidades relativas que coincidan entre las simulaciones de poros cerrados y abiertos, puesto que se recuerda que las espumas modeladas tienen el mismo tamaño de lado y de poro para ejecutar la comparación.

Se muestran los resultados de las diferentes simulaciones de la probabilidad y la probabilidad acumulada en función de la tensión de Von Mises (Fig. 5.3), (Fig. 5.4), (Fig. 5.5).

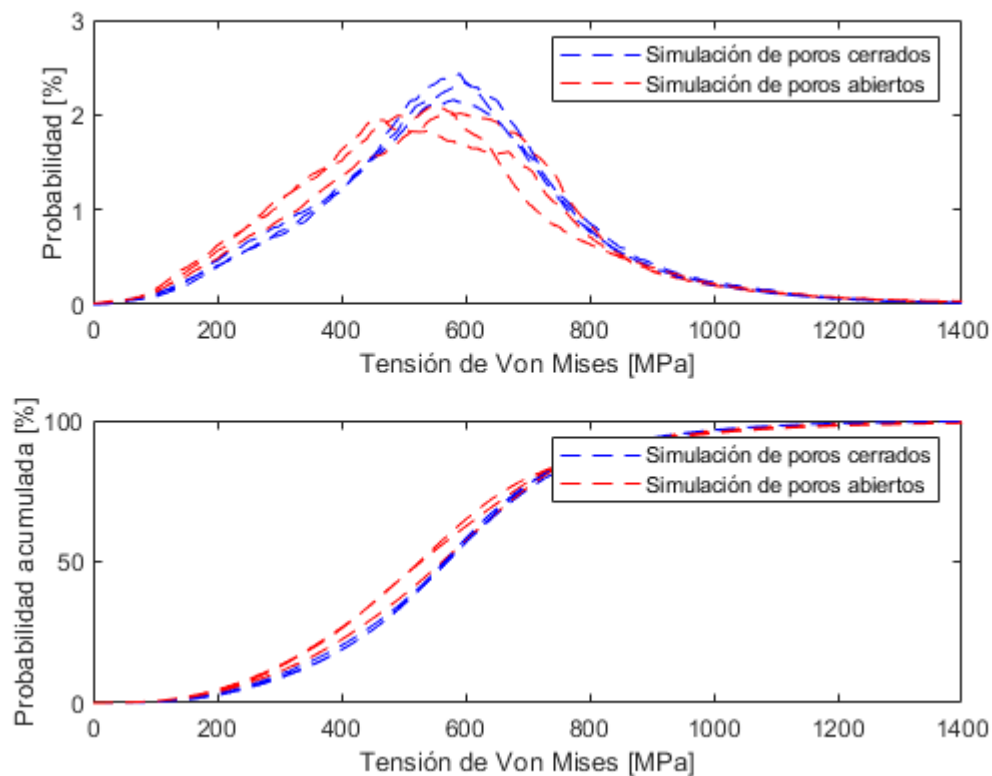


Fig. 5.3. Distribución de tensiones para espumas de aluminio con una densidad relativa del 70%.

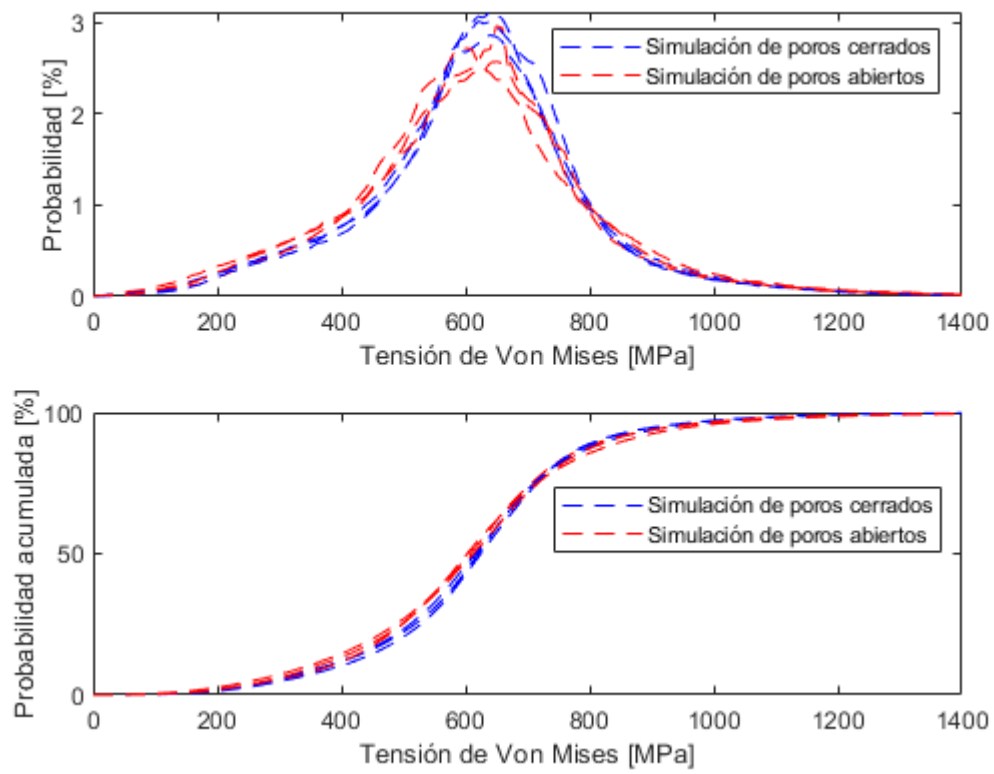


Fig. 5.4. Distribución de tensiones para espumas de aluminio con una densidad relativa del 80%.

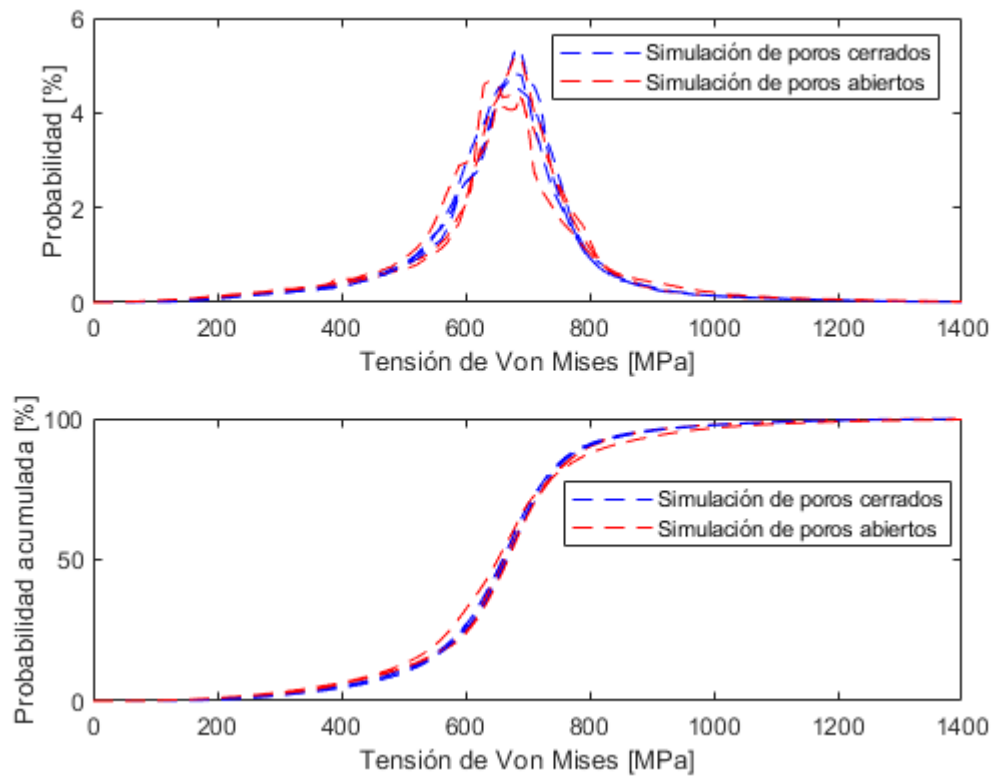


Fig. 5.5. Distribución de tensiones para espumas de aluminio con una densidad relativa del 90%.

Mediante este análisis se puede comprobar que la forma en la que se distribuyen las tensiones a lo largo de los elementos depende del tipo de poro.

En primer lugar, si se analiza la probabilidad, se observa que el punto álgido de la distribución de poros abiertos se mantiene para todos los casos en un valor ligeramente inferior al mismo punto para poros cerrados. A medida que disminuye la densidad relativa, mayor es esta diferencia. Esto significa que la tensión media es menor en las espumas de poros abiertos. Además de la tensión media, se puede observar que, en general, las curvas correspondientes a poros abiertos siguen este mismo patrón de estar desplazadas ligeramente hacia valores menores de tensión. Lo cual es consistente con los resultados obtenidos previamente para el módulo de Young, pues la tensión es menor en el caso de las espumas de poros abiertos puesto que el módulo de Young es menor para ellas. Es decir, la fuerza para alcanzar la misma deformación será menor para el caso de poros abiertos, lo que genera menor tensión que en las espumas de poros cerrados.

Además, si se analiza la probabilidad acumulada, se observa que las espumas de poros abiertos comienzan a ascender antes que las de poros cerrados, lo cual se explica por las menores tensiones para una misma deformación en las espumas de poros abiertos, como se explicó. No obstante, llega un punto en el que las espumas de poros cerrados tienen más probabilidad acumulada que las de poros abiertos. Esto se debe a la superposición de poros en las espumas de poros abiertos, lo que puede dar lugar a geometrías extrañas o acabadas en punta que actúan como concentrador de tensiones. Es decir, mientras que las espumas de poros cerrados tienen mayor tensión media, las espumas de poros abiertos tienen tensiones máximas más elevadas debido a estos concentradores de tensiones. Por ello, las espumas de poros cerrados acaban alcanzando antes la probabilidad acumulada del 100% pese a tener mayores tensiones medias, pues tienen tensiones máximas más bajas.

En relación con esto último, el hecho de que las espumas de poros abiertos puedan tener geometrías extrañas que actúan como concentrador de tensiones también se observa en la gráfica de la probabilidad, pues las gráficas de estas espumas presentan numerosos picos consecuencia de variaciones extrañas de estas tensiones. Por otro lado, las espumas de poros cerrados tienen curvas más suaves sin variaciones intermedias, al no tener superposición de poros que actúen de concentrador de tensiones.

5.3 Distribución de tensiones en función de la densidad relativa

Una vez estudiado el efecto del tipo de poro sobre la tensión equivalente de Von Mises, se ha estudiado el efecto de la densidad relativa. Para este estudio se han usado simulaciones correspondientes a espumas metálicas de poros abiertos, para tener un mayor número de datos.

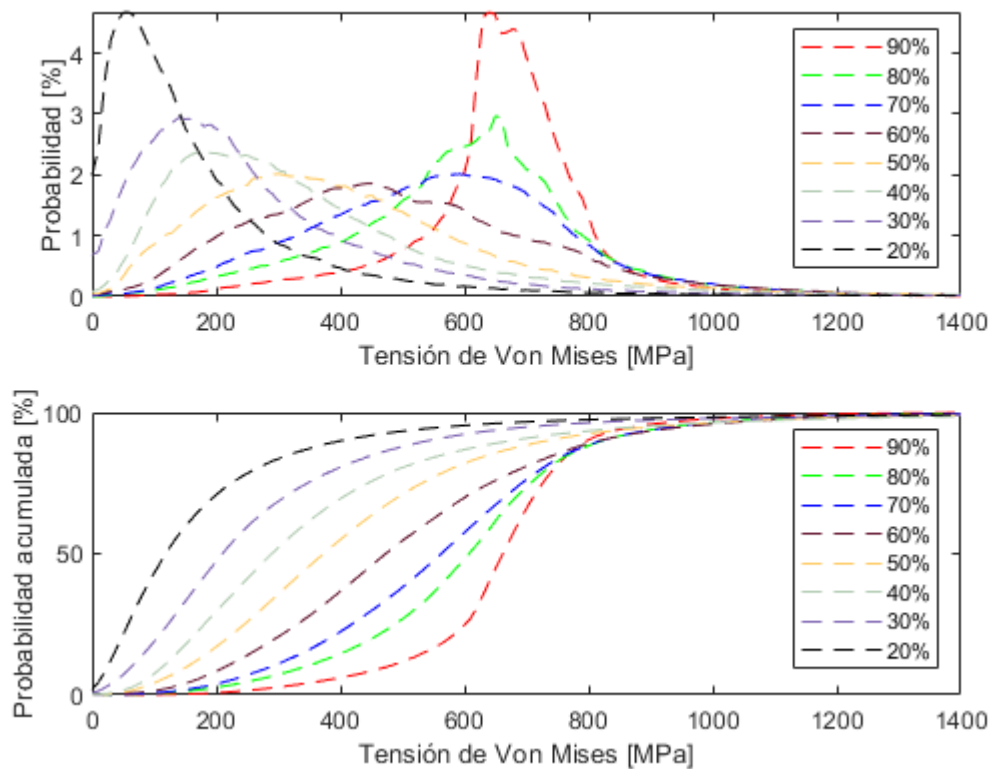


Fig. 5.6. Distribución de tensiones para espumas de aluminio abiertas con densidades relativas de entre un 20% a un 90%.

Se evidencia una dependencia de las tensiones frente a la densidad relativa.

En primer lugar, se observa que, para una misma deformación, las tensiones medias son más altas cuanto mayor es la densidad relativa. Esto está en relación con lo anteriormente analizado del módulo de Young en función de la densidad relativa, que implica que a mayor densidad relativa mayor es el módulo de Young y, por lo tanto, mayor es la tensión a aplicar para producir el desplazamiento.

Además, se observa que las curvas de probabilidad para bajas y altas densidades relativas son más estrechas que para las de densidades relativas entre ambas. Esto significa que las tensiones están más concentradas en torno a un valor, mientras que para densidades medias las tensiones están más repartidas entre distintos valores.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

Son diversas las conclusiones que se pueden sacar del presente proyecto.

En primer lugar, se ha conseguido generar un código que automatice la generación de la espuma metálica microscópica y aplique las condiciones de contorno para su correcta homogeneización, así como realizar la discretización y posterior simulación. Esto ha ahorrado una gran cantidad de tiempo. Además, gracias a ello se han conseguido hacer modelos aleatorios, algo que de forma manual sería muy complicado.

Se ha demostrado que, para una simulación de un ensayo a comprensión de una espuma a escala microscópica, las condiciones de contorno que homogeneizan el dominio pueden simplificarse de condición de contorno periódica a condiciones de contorno simétricas por tres planos, reduciendo de forma significativa el tiempo de cálculo.

Se ha conseguido generar modelos de diferentes distribuciones de poros con hasta un 80% de porosidad sin que los poros separen el cuerpo de forma significativa, evitando que haya elementos de volumen que no contribuyan a la rigidez. Se calculó que para esta porosidad la fracción de volumen separada era menor de 0.0001%.

Se han estudiado diversos volúmenes elementales representativos en función del tamaño de la espuma y del tamaño de poros por la influencia en la solución que pueda tener. Se ha estimado que, para evitar fluctuaciones relativamente grandes en la solución, el tamaño de la espuma debe ser de al menos 4 veces el tamaño del poro.

El módulo de Young obtenido mediante simulaciones para tres espumas de diferentes distribuciones y tamaño de poros y materiales han resultado ser acordes a diversos estudios experimentales y expresiones obtenidos de la literatura. Son especialmente ajustados para porosidades de hasta el 40%. En concreto se ha obtenido un coeficiente de determinación para poros cerrados de 0.998 y de 0.971 para poros abiertos, lo que indica que el modelo descrito en el presente proyecto se ajusta correctamente a correlaciones provenientes de estudios experimentales.

Además, las distribuciones de tensiones dependen del tipo de poro, siendo las espumas metálicas de poros abiertos las que tienen menor tensión media pero mayor tensión máxima debido a su geometría, que puede actuar de concentrador de tensiones. Esto hace que la distribución de tensión de una espuma de poros cerrados sea más previsible, pues se ajusta a una curva suave.

6.2 Trabajos futuros

Concluido el presente proyecto y con vistas a una posible continuidad de este estudio, se proponen algunas sugerencias para el futuro.

En primer lugar, se podría hacer un estudio de la variación del módulo de Young en función de la velocidad de deformación inducida en las condiciones de contorno, simulando un ensayo de comprensión real.

También se podría variar la generación de poros, aun incrementando el tiempo de generación del modelo, mediante el vaciado de diferentes tamaños de esferas comprendidas en un rango a estudiar. De esta forma es probable que se llegue a mayor porosidad en el modelo de poros cerrados.

Se podrían incluir propiedades plásticas al modelo, de forma que se pueda estudiar mediante simulaciones el límite elástico, el endurecimiento por deformación o la tensión de rotura.

Además, podría generarse un modelo con poros de distinta forma y estudiar la variación de las propiedades.

7. PLANIFICACIÓN

Planificar el trabajo a realizar a lo largo del proyecto es esencial para un uso adecuado de los recursos temporales y materiales.

Se ha dividido el grueso del trabajo en tres partes diferenciadas: documentación, generación del modelo y elaboración de la memoria.

La documentación consiste en la búsqueda de información tanto del tema general, como definición, clasificación, fabricación y aplicaciones de las espumas metálicas de diversos materiales, como de los recursos adicionales necesarios para la realización del proyecto, como la documentación relativa al lenguaje de programación Python.

La generación del modelo se corresponde con los recursos temporales empleados en la generación del dominio de cálculo y su correspondiente automatización por medio del código, así como las simulaciones destinadas a la obtención de parámetros necesarios para las simulaciones finales, como el análisis de sensibilidad de la malla o el tamaño óptimo relativo de la espuma, así como las propias simulaciones finales.

La elaboración de la memoria será el último bloque, en el que se explicarán por escrito los dos bloques anteriores.

Como se comentó, en primer lugar, se reunirá documentación del proyecto a realizar de forma que antes de empezar a trabajar haya una base teórica sólida. Se comenzará por definir estos materiales, comprender las distintas formas de fabricación y las diferentes propiedades y tipologías que acarrean. Por último, se estudiarán las aplicaciones y el tipo de espumas metálicas más usadas en ellas. Todo esto se planifica de forma secuencial. Una vez llegados a este punto se puede comenzar a escribir en el informe la parte relativa a la introducción, de forma que se expliquen qué motivaciones y objetivos persigue este trabajo, y al estado del arte de estos materiales. Mientras tanto se ha estudiado también el lenguaje de programación a usar y la forma de implementarlo en Abaqus/CAE. Una vez se tienen los conocimientos teóricos y las herramientas se da paso al planteamiento del problema, donde se consulta la literatura y deliberan las diferentes opciones para afrontar el problema.

Una vez finalizada la labor de documentación se prosigue con la generación del modelo numérico y posterior programación. Se podrá escribir en el informe también la parte de

cómo se ha construido el modelo una vez terminado. Se afinan aspectos necesarios para obtener resultados válidos en las simulaciones, como el análisis de la malla y el análisis del dominio de cálculo en función de otros parámetros. Una vez se tiene todo preparado, comienzan las simulaciones finales, de donde se obtienen los resultados, que podrán ser incluidos en el informe. Se concluirá con la conclusión del proyecto y la revisión del informe completo.

Toda esta información queda recogida en el diagrama de Gantt (Fig. 7.1), herramienta habitual de planificación de proyectos. En concreto, el proyecto completo conllevará 6 meses de trabajo

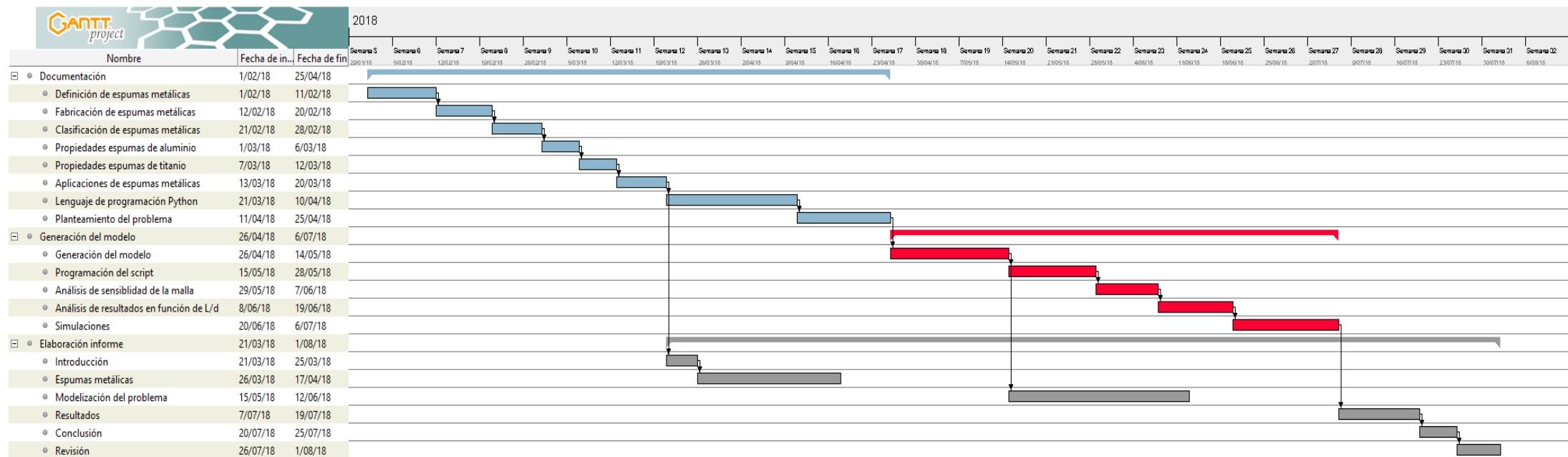


Fig. 7.1. Diagrama de Gantt del proyecto

8. PRESUPUESTO

Uno de los aspectos más importantes de un proyecto es la realización del presupuesto y aunque el presente trabajo es de ámbito académico se simulará un presupuesto lo más cercano a la realidad posible.

Como se indicó anteriormente en la planificación, la realización del proyecto se ha llevado a cabo en 6 meses.

Para el cálculo del coste de este proyecto se tendrán en cuenta los costes de mano de obra, de materiales y de los programas informáticos usados.

Los costes de mano de obra se dividen entre el trabajo del alumno y el del tutor. Las horas del trabajo del alumno vienen dadas por el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) mediante el Sistema Europeo de Transferencia y Acumulación de Créditos (ECTS). Se estima que la realización del trabajo fin de grado requiere un trabajo del alumno de 12 ECTS, dado que el equivalente de 1 ECTS son 25 horas se puede estimar de forma simple las horas de trabajo del alumno.

$$\text{Trabajo del alumno } (h) = 12 \text{ ECTS} \cdot 25 \frac{h}{\text{ECTS}} = 300 h$$

Se estimará que la hora de trabajo del alumno como ingeniero se paga a 11.50€ [37].

Las horas de trabajo del tutor también se puede estimar mediante la normativa del trabajo de fin de grado de la Universidad Carlos III de Madrid que la estima en 63 horas. Se estima que la hora de trabajo del tutor se paga a 77.5€ [38].

El único material empleado es un ordenador, usado para la búsqueda de información, para realizar las simulaciones y sus respectivos análisis. El precio de este ordenador es de 1200€ y se estima un plazo de amortización lineal de 3 años. Como este proyecto ha tenido una duración de medio año, se deberá calcular el coste de este ordenador en el proyecto, teniendo en cuenta que al final del período de amortización se pretende vender por 500€.

Los programas usados en este proyecto son: Abaqus/CAE para la realización de las simulaciones, Matlab para el análisis de resultados y el paquete Microsoft Office para la elaboración del informe. Estos programas se compran mediante licencias de 1 año de duración. Como el período de validez de la licencia no coincide con el del proyecto, se calculará su amortización teniendo en cuenta que el valor residual es nulo en todos ellos.

La licencia de Abaqus/CAE anual tiene un coste de aproximadamente 30.000€ al año, mientras que el coste de la licencia de Microsoft Office es de 105.6€ al año y el de Matlab 800€.

Para las amortizaciones se ha usado la siguiente expresión.

$$C = \frac{V_a - V_r}{t_{amort}} \cdot t_{proy} \quad (8.1)$$

Donde

- C es el coste del elemento a amortizar en el presente proyecto.
- V_a es el precio de adquisición del elemento.
- V_r es el valor residual del elemento.
- t_{amort} es el período de amortización del elemento.
- t_{proy} es el período de duración del proyecto, de valor 0.5 años.

Se adjunta en forma de tabla el presupuesto total.

TABLA 8.1. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Coste mano de obra				
	Coste unitario (€/h)	Tiempo empleado (h)		Coste total (€/h)
Tutor	77.50	63		4882.50
Alumno	11.50	300		3450.00
Coste material				
	Precio de adquisición (€)	Valor residual (€)	Amortización (año)	Coste total (€)
Ordenador	1200.00	500	3	116.67
Coste software				
	Precio de adquisición (€)	Valor residual (€)	Amortización (año)	Coste total (€)
Abaqus/CAE	30000.00	0	1	15000.00
Microsoft Office	105.60	0	1	52.80
Matlab	800.00	0	1	400.00
Coste del proyecto (€)				23901.97

El coste del proyecto se cifra en 23901.97€.

9. REFERENCIAS

- [1] J.Banhart y D. Weaire, «On the road again: metal foams find favor,» *Physics Today*, nº 55, pp. 37-42, 2002.
- [2] J. Banhart, «Manufacturing Routes for Metallic Foams,» *JOM*, vol. 52, pp. 22-27, 2000.
- [3] «Metalfoam,» [En línea]. Disponible en: www.metalfoam.net. [Último acceso: 13 Julio 2018].
- [4] S.K.Nammi, P.Myler y G.Edwards, «Finite element analysis of closed-cell aluminium foam under quasi-static loading,» *Materials & Design*, vol. 31, nº 2, pp. 712-722, 2010.
- [5] S. Krajewski y J. Nowacki, «Structure of AlSi–SiC composite foams surface formed by mechanical and thermal cutting,» 2015.
- [6] J. Banhart y J. Baumeister, *Production Methods for Metallic Foams*, Bremen, 1998.
- [7] J. Banhart, M.F. Ashby y N.A. Fleck, «Foaming of liquids and casting,» de *Metal Foams and Porous Metal Structures*, Bremen, Verlag MIT Publishing, 1999, pp. 125-163.
- [8] M.F. Ashby et al., «Making metal foams,» de *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth Heinemann, 2000, pp. 6-20.
- [9] F. Baumgärtner, I. Duarte y J. Banhart, «Industrialization of Powder Compact Toaming Process,» *Advanced Engineering Materials*, vol. 2, nº 4, p. 168, 2000.
- [10] F. García-Moreno, «Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production,» *Materials*, vol. 9, nº 2, pp. 85-93, 2016.
- [11] J.A. Gutiérrez-Vázquez y J. Oñoro, «Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones,» *Revista de metalurgia*, vol. 5, nº 44, pp. 457-476, 2008.
- [12] J. Banhart, «Aluminium foams for lighter vehicles,» *Int. J. Vehicle Design*, vol. 37, nº 2/3, pp. 114-125, 2005.

- [13] M. Rodríguez, *Las espumas de aluminio se abren paso en el sector de los transportes*. [Entrevista]. 10 Septiembre 2008.
- [14] «ERG materials & aerospace,» ERG Aerospace Corp., [En línea]. Disponible en: <http://ergaerospace.com/applications/duocel-foam-heat-exchangers/>. [Último acceso: 2018 Julio 1].
- [15] B.Hernández, F. Aboites y H.J. Zúñiga, «Cojinetes de espuma de aluminio aplicado en rotores tipo jeffcot,» Congreso Internacional anual de la Sonim, Puebla, 2008.
- [16] V. Cortínez y P. Girón, «El método de los elementos finitos en la ingeniería práctica,» [En línea]. Disponible en: <https://www.frbb.utn.edu.ar/utec/utec/9/n03.html>. [Último acceso: 2 Julio 2018].
- [17] J.Alsayednoor, P.Harrison y Z.Guo, «Large strain compressive response of 2-D periodic representative volume element for random foam microstructures,» *Mechanics of Materials*, vol. 66, pp. 7-20, 2013.
- [18] E.W. Andrews, G. Gioux, P. Onck y L.J. Gibson, «Size effects in ductile cellular solids. Part II,» *International Journal of Mechanical Sciences*, n° 43, pp. 701-713, 2001.
- [19] H.J. Böhm, «A short introduction to basic aspects of continuum micromechanics».
- [20] S. Das et al., «A microstructure-guided constitutive modeling approach for random heterogeneous materials: Application to structural binders,» *Computational Materials Science*, vol. 119, pp. 52 - 64, 2016.
- [21] F. Walter, «Meshing Your Geometry: When to Use the Various Element Types,» Comsol, 4 Noviembre 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.comsol.com/blogs/meshing-your-geometry-various-element-types>. [Último acceso: 2018 Agosto 11].
- [22] G. Dhondt, «Element Types,» Massachusetts Institute of Technology, 2 Marzo 2014. [En línea]. Disponible en: http://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node25.html. [Último acceso: 2018 Agosto 11].

- [23] H.J. Böhm, «Volume Elements,» de *A short introduction to basic aspects of continuum micromechanics*, Viena, 1998, p. 6.
- [24] «Matweb,» 1996. [En línea]. Disponible en: www.matweb.com. [Último acceso: 2 Junio 2018].
- [25] F.Garcia-Moreno, M. Mukherjee, E. Solórzano y J. Banhart, «Metal foams – towards microcellular materials,» *International Journal of Materials Research*, n° 101, pp. 1134-1139, 2010.
- [26] K. Alvarez, y H. Nakajima, «Metallic Scaffolds for Bone Regeneration,» *Materials*, vol. 2, n° 3, pp. 790-832, 2009.
- [27] L.M. Reis de Vasconcellos et al., «Porous titanium scaffolds produced by powder metallurgy for biomedical applications,» *Materials Research*, vol. 11, n° 3, pp. 275-280, 2008.
- [28] M. Guden, E. Celik, S. Cetiner y A. Aydin, «Metals Foams for Biomedical Applications: Processing and Mechanical Properties.,» *Advances in experimental medicine and biology*, n° 553, pp. 257-66, 2004.
- [29] J.F. López, «R Cuadrado (Coeficiente de determinación),» Economipedia, [En línea]. Disponible en: <http://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html>. [Último acceso: 8 Agosto 2018].
- [30] M. Weber, J. Baumeister, J. Banhart y H.D. Kunze, «Selected mechanical and physical properties of metal foam,» *Powder Metallurgy World Congress*, vol. 1, pp. 585-588, 1994.
- [31] C. Yu y J. Banhart, «Mechanical Properties of Metallic Foams,» pp. 37-48, 1998.
- [32] Y.X.Gan, C. Chen y Y.P.Shen, «Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams,» *Journal of Solids and Structures*, n° 42, pp. 6628-6642, 25.
- [33] F. Zhang, E. Otterstein y E. Burkel, «Processing and Mechanical Properties of Ti foams,» *Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2010*, vol. 1, pp. 65-69, 2010.

- [34] S. K. e. al., «Fracture toughness of titanium foams for medical applications,» *Materials Science and Engineering*, vol. 527, nº 29-30, pp. 7689-7693, 2010.
- [35] S.Y. Chen et al., «Microstructure and mechanical properties of open-cell porous Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting,» *Journal of Alloys and Compounds*, nº 713, pp. 248-254, 2017.
- [36] M.F. Ashby et al., «Foam properties: an overview 4.3,» de *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth-Heinemann, 2000, pp. 42-48.
- [37] «Mechanical Engineer Salary,» PayScale, [En línea]. Disponible en: https://www.payscale.com/research/ES/Job=Mechanical_Engineer/Salary. [Último acceso: 18 08 2018].
- [38] «Senior Mechanical Engineer Salary,» Payscale, [En línea]. Disponible en: https://www.payscale.com/research/ES/Job=Senior_Mechanical_Engineer/Salary. [Último acceso: 2018 Agosto 18].